

## НЕСТАЦИОНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ В МАГИСТРАЛЬНОМ ГАЗОПРОВОДЕ С РАЗВИТОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

*Якунин А.В., Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова*

Нестационарный поток в магистральном газопроводе (МГ) с развитой шероховатостью рассматривается как турбулентное течение с тонким пристеночным ламинарным слоем. Такой режим характерен для МГ с линейными участками протяженностью порядка нескольких сотен километров, прокладываемыми по дну морей или через горные перевалы, когда установка промежуточных компрессорных станций технически невозможна, а при этом в начале каждого участка создается аномально высокое давление до  $15 \div 25 \text{ МПа}$ . Плотность транспортируемого газа достигает значений  $150 \div 200 \text{ кг/м}^3$ , скорость звука в нем увеличивается до  $500 \div 600 \text{ м/с}$ , а амплитуда волн давления и разрежения может превышать  $1 \text{ МПа}$ , с чем необходимо считаться при проектировании и эксплуатации оборудования МГ. Даже если уровень пульсаций давления не представляет опасности для стенок трубопровода, он может негативно повлиять на работу запорной арматуры и газоперекачивающих агрегатов, вызвать несанкционированное срабатывание систем контроля и автоматики.

Одной из причин нестационарных процессов в МГ может служить сейсмическое воздействие. Более чем на 10% территории бывшего Советского Союза наблюдаются сильные землетрясения (семь баллов и выше), в том числе на Прикарпатье и в Крыму, которые могут вызвать серьезные нарушения штатной работы МГ. Основная цель исследований сейсродинамики протяженных МГ состоит в выработке рекомендаций, которые позволят учесть особенности изменения напряженно-деформированного состояния стенок трубопровода и характер протекания гидродинамических процессов в газовом потоке. При этом они должны быть экономически целесообразными и согласованными с общей стратегией магистрального транспорта газа.

В общем случае, взаимодействие в системе «окружающая среда – трубопровод – транспортируемый газ» носит сложный трехсторонний обоюдный характер. В прикладных задачах, как правило, полагается, что движение среды (грунта) задано и не искажается другими компонентами системы. В частности, считается, что трубопровод не оказывает существенного влияния на механику грунта, однако сам вовлекается в движение и деформацию грунта. При этом трубопровод под внешним воздействием сейсмической волны рассматривается как тонкостенная оболочка, жестко впаянная в сплошную среду – внешний грунтовый массив. Колебания и деформации трубопровода вызывают пульсации внутреннего газового потока. В свою очередь, нестационарные процессы в транспортируемом газе становятся причиной динамических деформаций трубопровода. При расчетах эта обоюдность связей часто игнорируется, что упрощает постановку и решение соответствующих задач и во многих случаях поз-

воляет получить практически приемлемые по точности результаты.

Среди обсуждаемых проблем особенную актуальность в последнее время приобрели вопросы гидроаэроупругости, но и гидродинамические аспекты сохраняют свою злободневность. В данной работе в одномерной постановке рассматриваются нестационарные гидродинамические процессы в горизонтально расположенном линейном участке (ЛУ) МГ, вызванные плоской продольной сейсмической волной, которая распространяется вдоль оси трубопровода, не приводя к ее смещению. Определяется распределение давления вдоль трассы ЛУ МГ при заданных его значениях на концах трубопровода.

Предполагается, что каждая точка  $x$  трубопровода движется с ускорением по одному и тому же закону, который задается акселерограммой сейсмического воздействия. Если ввести неинерционную систему отсчета, связанную с трубопроводом, то его движение с ускорением приведет к появлению нестационарных распределенных массовых сил, действующих на весь объем газа в трубопроводе. При этом неустановившееся изотермическое движение газа (с обычно вводимыми упрощениями) описывается одномерной квазилинейной системой дифференциальных уравнений гиперболического типа с дополнительным членом, который учитывает действие внешних инерционных сил. Соответствующая краевая задача допускает расщепление по малому параметру  $\varepsilon$ , который для ЛУ МГ высокого давления с развитой шероховатостью имеет порядок  $\varepsilon = 10^{-1} \div 10^{-2}$  и выше. К редуцированной задаче применяется метод операционного исчисления с нетрадиционным представлением решения в области изображений, что позволяет перейти к оригиналам с использованием теоремы свертки. Оперирование с разработанной интегрально-разностной моделью сводится к рекуррентным процедурам последовательного интегрирования.

Преимущество предложенного интегрально-разностного подхода к описанию нестационарных процессов в ЛУ МГ состоит в следующем: а) он не накладывает существенных ограничений на форму акселерограммы и охватывает, в том числе, быстро осциллирующие сейсмические воздействия; б) из него непосредственно следует агрегированное представление неустановившегося течения в газопроводе; в) он позволяет строить оригиналы изображений по Лапласу без нахождения корней характеристических уравнений, разложения операторного коэффициента распространения волны и операторного волнового сопротивления в бесконечные ряды, что значительно упрощает математические выкладки и повышает точность расчетов; г) полученные рекуррентные процедуры допускают простую программную реализацию; д) учет специфики задачи открывает возможность упростить вычислительный процесс и повысить его быстродействие, а также выбрать алгоритмы вычисления квадратур, обеспечивающие допустимую величину погрешности результатов; е) построение дискретного аналога интегрального уравнения свертки непосредственной заменой операции непрерывного интегрирования суммированием с использованием подходящей квадратурной формулы приводит непрерывную динамическую систему с распределенными параметрами к дискретной.