РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН ВОЗМУЩЕНИЯ, ВЫЗВАННЫХ МГНОВЕННЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ МАССОВОГО РАСХОДА ГАЗА В КОНЦАХ ЛИНЕЙНОГО УЧАСТКА ГАЗОПРОВОДА

Ф.А.АЛИЕВ, И.К.ХУЖАЕВ, М.А.КУКАНОВА

Қувурда тўлқин динамикасига доир масаланинг газ инерцияси ва ишқаланиш кучини ҳисобга олган ҳолда олинган аналитик ечими асосида магистраль газ қувурининг чизиқли қисмида тарқалаётган тўлқинларнинг қонуниятлари ўрганилган.

On the base of known analytical solution of the problem about wave dynamics in the pipeline, with partial calculation of inertia and friction forces, lows of spreading of waves in the horizontal part of the pipeline are studied.

Функционирование системы магистральных газопроводов носит стохастический характер и зависит от включения или отключения потребителей. Соответственно этим изменениям и согласно технологическим ограничениям подключаются или останавливаются дополнительные нагнетатели компрессорных станций. Каждое подобное изменение приводит к перерасчету газодинамических показателей гидравлической сети. Знание закономерностей переходного режима функционирования позволяет организовать бесперебойной доставки целевого продукта до потребителя в необходимом количестве и предотвратить возникновения «внештатных ситуаций» в системе магистральных газопроводов.

В работе представлены результаты вычислительного эксперимента о распространении мгновенного изменения массового расхода газа в магистральном газопроводе согласно аналитическому решению из [1], где для моделирования распространения волн возмущения привлечена система квазиодномерных уравнений Н.Е.Жуковского

$$-\frac{\partial p}{\partial x}=\frac{\lambda w_* w}{2D}\rho+\frac{\partial \rho w}{\partial t},\quad -\frac{1}{c^2}\frac{\partial p}{\partial t}=\frac{\partial(\rho w)}{\partial x}. \qquad (1)$$

Аналитическое решение задачи получено с приведением системы (1) к уравнению относительно массового расхода газа $M=\rho w F$

$$\frac{\partial^2 M}{\partial \tau^2}+b\frac{\partial M}{\partial \tau}=\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}. \qquad (2)$$

Здесь и далее использованы обозначения $p,\ \rho,\ w,\ Z,\ R$ - давление, плотность и скорость в сечении x, коэффициент сверхсжимаемости и приведенная газовая постоянная газа; t, x - координаты по времени и длине; λ - коэффициент сопротивления трения; D, $F=\pi D^2/4$ - диаметр и площадь поперечного сечения трубопровода; c - скорость распространения малых возмущений давления; w_* - характерная скорость газа; $\tau=ct$; $b=\lambda w_*/(2Dc)$.

Вычислительные эксперименты проводились при следующих значениях параметров: $D=1,020$ м; входное и начальное давление 5,0-7,0 МПа; М=100-400 кг/с; R=485 Дж/кг/К; $\lambda=0,01=const$; c=400 м/с. Чтобы сгладить осцилляции показателей вокруг скачка до точности 10^{-10} пришлось брать до 400 членов разложения в решениях.

Результаты, которые получены при мгновенном закрытии выходного сечения при продолжении поступления газа в линейный участок, качественно повторяли результатов работы [1]. Заметные отличия обнаружены при большей протяженности газопровода, когда отражение волны возмущения становятся практически не заметными. Выявлено, что продолжительное поступление газа в короткий участок с закрытым выходным концом может привести к образованию недопустимо больших значений давления.

При мгновенном закрытии входного сечения и продолжении отбора газа из конца участка с прежней интенсивностью образуется волна разряжения. Т.е., в отличие от результатов работы [1] до наступления первого отражения волны кривая исходного распределения давления служит огибающей кривых давления сверху (рис. 1).

В начальный отрезок времени кривая давления

состоит из трех частей. В левой части кривой давление уменьшается из-за остановки потока через входное сечение. Потом кривая скачком растет - волна достигла этого сечения. После достижения своего локального максимума давление падает до исходного уровня распределения.

При достижении волной разряжения конец участка (при $t = t_* = l/c$) две первые части кривой давления исчезают. В конце участка возможно скачкообразное убивание давления на малую величину. При обратном движении волны после ее отражения кривые давления будут перевернутыми: скачкообразное изменение давления будет снизить значение давления – образуются опять три части кривой. После достижения $t = 2t_*$ волна опять опрокидывается и т.д. Постепенно скачкообразные изменения становятся более незаметными, а давление в участке постепенно падает.

Распределение скорости потока, которая определена из выражения массового расхода и уравнения состояния газа $p = Z\rho RT$, качественно повторяет характер изменения массового расхода. Разница заключается в том, что исходное и последующие распределения давления учитывают падение давления за счет силы трения. При этом исходное распределение скорости потока возрастающее: давление убывает по длине участка, что приводит к убыванию плотности газа. А это, согласно закону сохранения массы, приводит к увеличению скорости потока.

Аналогичные эксперименты проведены и для других значений параметров. Эти результаты показали, что при малых скоростях потока и больших значениях давления с достижением времени, кратных $t_* = l/c$, изменения огибающих становится заметным, но с истечением времени величины скачков сокращаются. Они могут быть верхними и нижними, которые чередуясь, стремятся занимать предельное положение согласно граничным условиям.

При закрытии обоих концов участка для кривых массового расхода и скорости газа образуются отдельные огибающие с двух концов участка, а для давления – единая по всей длине участка огибающая. В начальном отрезке времени наблюдаются сужение зоны исходного расхода с двух концов участка (рис. 2) и скачкообразные изменения как с возрастанием, так и с убиванием массового расхода. Крайние с концов части к ривых массового расхода имеют практически линейную форму.

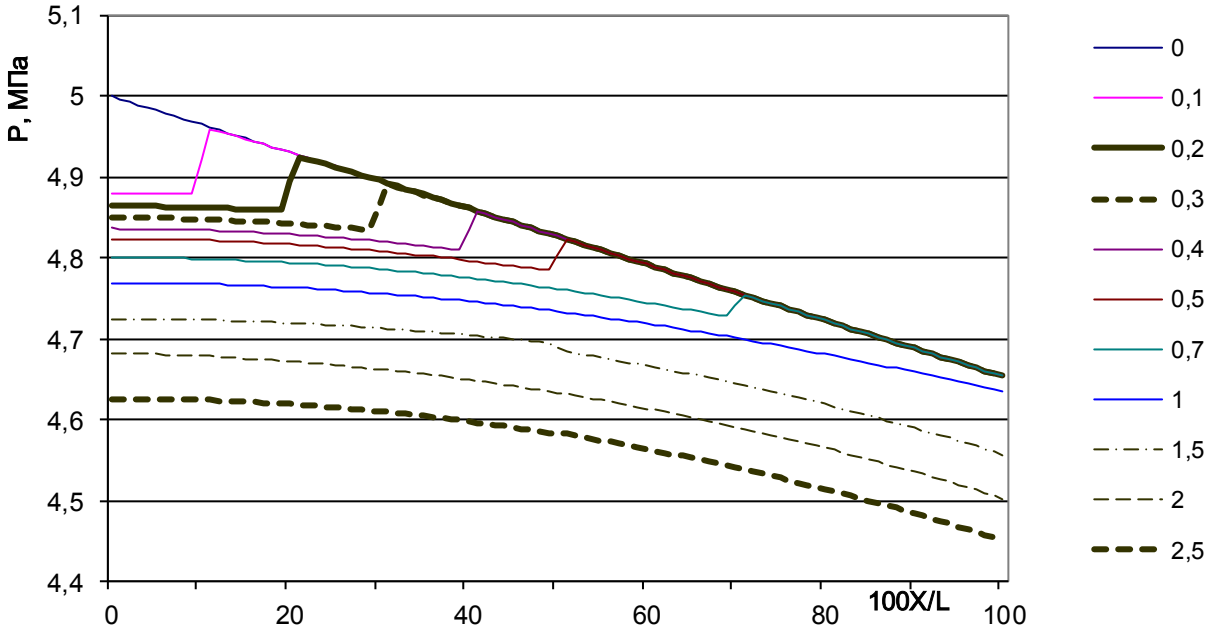


Рис. 1.
Изменение давления газа по длине участка при закрытии входного сечения. M_0=$M_к$=400 кг/с, P_{00}=5.0 МПа.

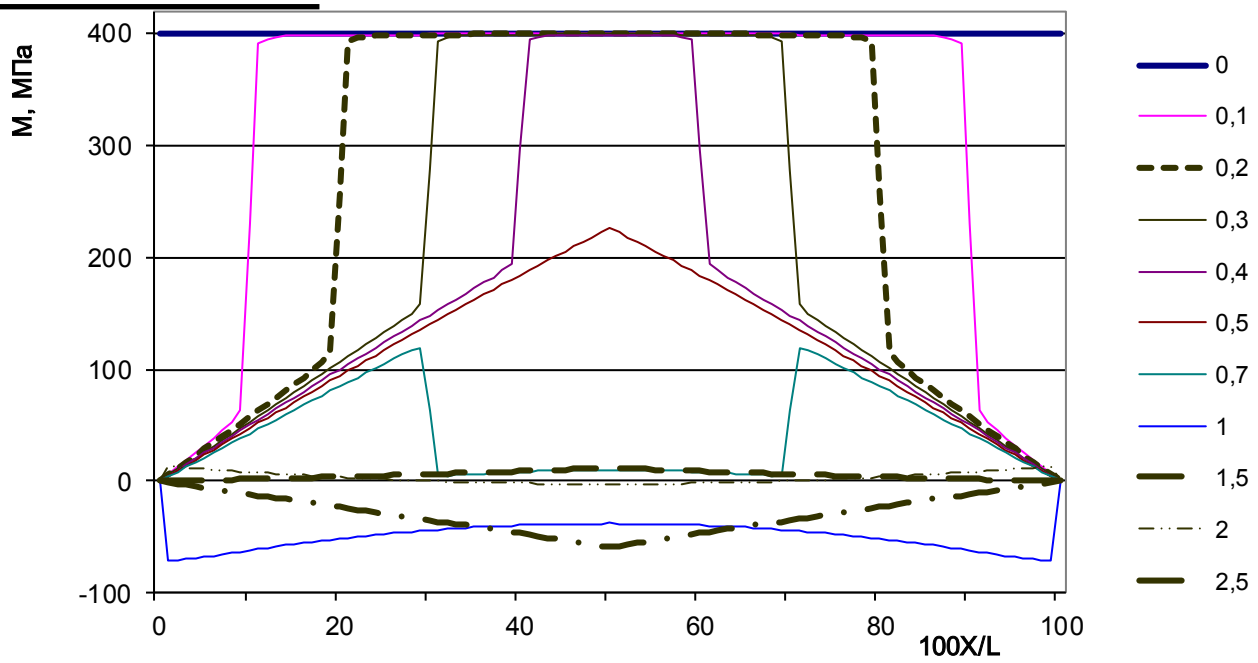


Рис. 2. Изменение массового расхода газа при закрытии обоих концов участка. M_0=400 кг/с.

При $t = 0.5t_*$ кривая массового расхода состоит из двух отрезков прямой линии. Далее из середины этого ломаного образуется отраженный выступ, который с истечением времени расширяется и углубляется. При этом крайние отрезка кривых массового расхода продолжают приближаться к нулю. При достижении ими концов участка массовый расход и скорость потока во всем участке будут отрицательными. В дальнейшем с двух концов участка скачки отрицательным расходом продвигаются к середине участка. С достижением геометрической середины участки опять волна опрокидывается и т.д. Каждое такое опрокидывание кривых расхода приводит к меньшему по абсолютному значению экстремума массового расхода. Таким образом, газ в участке стремится к покою.

Сравнение результатов расчета показали, что учет только силы инерции газа приводит к образованию скачков массового расхода, скорости и давления газа, а учет только силы трения приводит к монотонному изменению этих показателей по длине участка и по времени с образованием скачков в сечениях фронта и отражения волны. Соответственно, при больших значениях параметра b имеет место гладкое изменение показателей ($T_n^{(m)}(\tau)$ представляется гиперболическими функциями времени), а при малых значениях b - скачкообразные изменения ($T_n^{(m)}(\tau)$ представляются синусами и косинусами времени).

Общей закономерностью результатов является то, что кривые массового расхода, давления и скорости газа могут иметь одну (при закрытии одного конца участка) или двух огибающих в условном полупериоде колебаний. С истечением времени огибающие меняют свои положения: для массового расходе меняются значение и знак; а для давления - уклон и угловой коэффициент. Огибающие кривых стремятся занимать свое предельное положение. Благодаря силе трения эти изменения сопровождаются убыванием скачков параметров.

ЛИТЕРАТУРА:

[1] Хужаев И.К., Лебедев О.В.,Матмуродов Ф.М. Динамика волны жидкости по длине трубопровода // Узбекский журнал «Проблемы механики». – 2007, №1-2. – С. 51-54.

[2] Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. Изд. 2-е.- М.: Недра,1975.-296 с.