

УДК 621.757.007.52

В.В. Поливцев, аспирант*Севастопольский национальный технический университет,**ул. Университетская, 33 г. Севастополь, Украина. 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***ГАЗОВЫЙ УДАР ПРИ ОТКРЫТИИ И ЗАКРЫТИИ ЗАДВИЖЕК ТРУБОПРОВОДОВ
ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ**

Рассматриваются вопросы резкого возрастания давления в трубопроводах при открытии и закрытии газовых задвижек на газораспределительных станциях. Предложены математические модели, описывающие прямой и не прямой газовый удар с учетом постоянной и переменной плотностей газа. Представлены результаты моделирования позволяющие, оценить пределы увеличения давления при газовом ударе для различных базовых эксплуатационных давлений в трубопроводах.

Ключевые слова: автоматизация, газовый удар, давление, задвижка.

Автоматизированные газовые задвижки на газораспределительных станциях (ГРС) открываются и закрываются автоматически от быстродействующих газовых, гидравлических или пневматических приводов. При быстром открытии задвижки и большом перепаде давления перед задвижкой и после задвижки создается газовая волна, которая движется по трубопроводу с большой скоростью, достигая в некоторых случаях скорости распространения звука. При встрече такой газовой волны с преградой (регулятор давления, измерительные приборы и т.д.) в трубопроводе происходит резкий скачок давления, который может приводить «газовому удару». Природный газ в дальнейших физических и математических моделях рассматривается как сжимаемая среда при политропном термодинамическом процессе, без теплообмена с окружающей средой и отсутствием трения между частицами газа. Движение газа рассматривается по одной координате вдоль оси трубы и с одинаковыми параметрами давления, скорости и плотности в сечении трубы.

Целью данной работы является создание математических моделей описывающих резкое (скачкообразное) изменение (увеличение) давления в трубопроводах, которое приводит к газовому удару в процессе открытия и закрытия газовых задвижек на ГРС. Приведенные модели позволят оценить максимальные уровни давления, возникающего в трубопроводах при газовом ударе, что позволит исключить возможные аварийные ситуации на ГРС.

Время открытия (закрытия) газовых задвижек, от автоматических приводов, на трубопроводах с диаметром от 25 мм и до 50 мм может составлять 0,1...0,4 с. Указанное время открытия задвижки в этом случае меньше удвоенной фазы или одного периода (цикла) распространения ударной волны $t_z < t_\phi$ и газовый удар будет прямым [1,2]. В этом случае задвижка открыта полностью и давление после задвижки P_1 (в виде скачка давления) становится равным давлению до задвижки P_{1M} ($P_1 = P_{1M}$). Рассмотрим два подхода описания «газового удара» о преграду в трубопроводе.

Первый подход, когда плотность газа в момент удара остается величиной постоянной, равной плотности газа за фронтом ударной волны $\rho_{1y} = \rho_1$, при постоянном давлении за фронтом ударной волны P_1 (рисунок 1). Резкое изменение давления P_1 от начального давления P_{1H} в трубопроводе до открытия задвижки и давления P_{1M} , после открытия задвижки, приводит к образованию ударной волны, которая распространяется по трубопроводу. Плотность газа и давление за фронтом ударной волны становятся равными плотности газа и давлению до открытия задвижки $\rho_1 = \rho_{1M}$, $P_1 = P_{1M}$. Плотность газа ρ_{1M} до открытия задвижки при политропном процессе можно определить из выражения

$$\rho_{1M} = \rho_a \left(\frac{P_{1M}}{P_a} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (1)$$

где ρ_{1M}, ρ_a – плотность газа перед задвижкой и при атмосферном давлении в трубопроводе; P_a – атмосферное давление; P_{1M} – давление газа в трубопроводе перед задвижкой и в момент открытия задвижки, n – показатель политропного процесса.

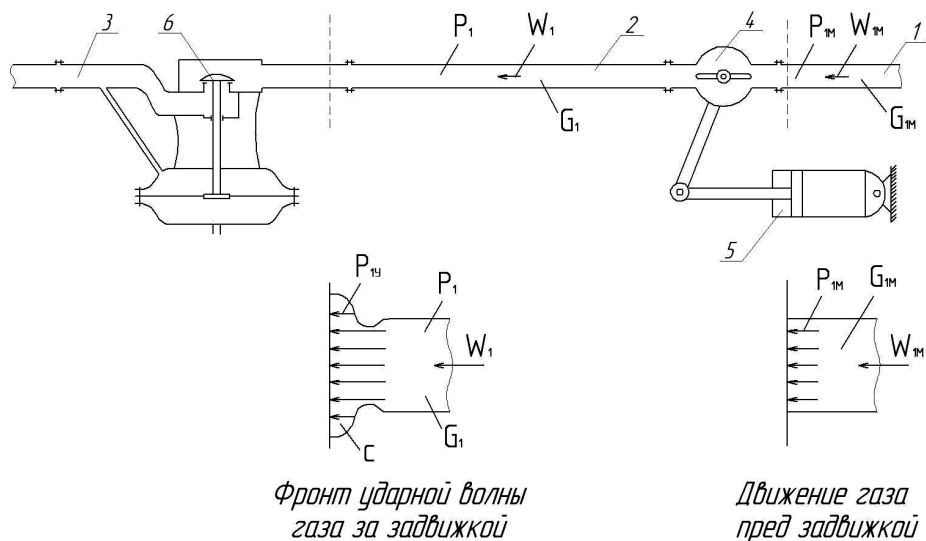


Рисунок 1 – Физическая модель движения природного газа по трубопроводу до и после задвижки

С учетом того, что плотности газа перед фронтом ударной волны и за ним принимаются равными, можно записать уравнение

$$\rho_{1Y} = \rho_1 = \rho_{1M} \quad (2)$$

Для прямого газового удара с учетом выражений (1), (3) можно определить давление газа, возникающее во фронте ударной волны:

$$P_{1Y} = P_1 + c_Y \rho_H \left(\frac{P_{1M}}{P_H} \right)^{\frac{1}{n}} W_1 \quad (3)$$

Здесь P_{1Y} – давление газа во фронте (или перед фронтом) ударной волны; $c_Y = \sqrt{\frac{nRT}{\rho_a}}$ – скорость распространения ударной волны газа и ρ_a – плотность газа при атмосферном давлении; T – температура газа в Кельвинах; P_1 – давление газа (конечное) после открытия задвижки $P_1 = P_{1M}$; W_1 – начальная скорость движения газа после открытия задвижки (скорость движения газа за фронтом ударной волны). Скорость движения газа по трубопроводу после открытия задвижки не может превышать скорости распространения звука $c_{зв}$ в природном газе и для политропного процесса определяется из выражения [2]

$$W_1 = \frac{1}{\sqrt{1+\xi}} \sqrt{\frac{2nRT_{1M}}{n-1} \left[1 - \left(\frac{P_{1H}}{P_{1M}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}, \quad (4)$$

где ξ – коэффициент местных потерь газа при проходе через запорную часть задвижки, P_{1H} – начальное давление в трубопроводе после задвижки до ее открытия и в начальный момент после ее открытия.

Второй подход заключается в том, что рассматривается ситуация, когда плотность газа в процессе удара не является величиной постоянной. Используем при резком изменении давления для политропного процесса уравнение Гюгонио изменения плотности газа [4]

$$\rho_{1Y} = \rho_1 \frac{1 + \left(\frac{n+1}{n-1} \right) \frac{P_{1Y}}{P_1}}{\frac{n+1}{n-1} + \frac{P_{1Y}}{P_1}}, \quad (5)$$

где ρ_{1Y} – плотность газа перед фронтом ударной волны после открытия задвижки ρ_1 – плотность газа за фронтом ударной волны после открытия задвижки, P_{1Y} – давление газа перед фронтом ударной волны,

P_1 – давление газа за фронтом ударной волны. Давление газа P_1 и плотность ρ_1 после открытия задвижки, которые изменяются резким скачком от начального давления P_{1H} и плотности ρ_{1H} в трубе $P_1 = P_{1H}$, $\rho_1 = \rho_{1H}$ до открытия задвижки и конечного значения, равного давлению и плотности в газовой трубе перед задвижкой до ее открытия $P_1 = P_{1M}$, $\rho_1 = \rho_{1M}$.

Подставим плотность ρ_{1Y} из уравнения (5) в выражение (3) и получим давление газа перед фронтом распространяющейся ударной волны с учетом переменной плотности в виде выражения

$$P_{1Y} = P_1 + \rho_1 \frac{1 + \left(\frac{n+1}{n-1}\right) \frac{P_{1Y}}{P_1}}{\frac{n+1}{n-1} + \frac{P_{1Y}}{P_1}} W_1 c_Y, \quad (6)$$

где W_1 – скорость движения газа по трубопроводу за фронтом ударной волны и определяется из уравнения (4), при условии $P_1 = P_{1M}$.

Преобразуем выражение (6) относительно P_{1Y} и получим уравнение

$$P_{1Y}^2 + \left[P_1 \left(\frac{n+1}{n-1} \right) - P_1 - \left(\frac{n+1}{n-1} \right) c_Y W_1 \rho_1 \right] P_{1Y} - P_1 \left[\left(\frac{n+1}{n-1} \right) P_1 + \rho_1 W_1 c_Y \right] = 0. \quad (7)$$

Выражение (7) представляет квадратное уравнение вида:

$$P_{1Y}^2 + B P_{1Y} - C = 0, \quad (8)$$

где $B = P_1 \frac{n+1}{n-1} - P_1 - \left(\frac{n+1}{n-1} \right) c_Y W_1 \rho_1$; $C = P_1 \left[\left(\frac{n+1}{n-1} \right) P_1 + \rho_1 W_1 c_Y \right]$.

Уравнения (7), (8) позволяют определить давление фронта ударной волны на различное оборудование в трубопроводе с учетом изменения плотности газа во фронте ударной волны.

Газовые трубопроводы диаметром от 80 мм до 250 мм с задвижками, применяемые на ГРС, при их открытии (закрытии) от автоматических приводов имеют время срабатывания t_3 от 0.5с до 5с. Такое время срабатывания задвижек $t_3 > t_{\phi}$ больше времени периода распространения ударной волны по трубопроводу. В этом случае удар рассматриваем как непрямой [1, 2]. При непрямом ударе возможны два варианта определения давления за фронтом ударной волны в процессе газового удара.

Рассмотрим первый вариант, когда плотность газа ρ_{1Y} в момент удара остается величиной постоянной, равной плотности газа ρ_1 за фронтом ударной волны [2], т.е. $\rho_{1Y} = \rho_1$. Тогда плотность газа за фронтом ударной волны с учетом политропного процесса находим из уравнения

$$\rho_1 = \rho_{1H} \left(\frac{P_1}{P_{1H}} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (9)$$

где P_{1H} – начальное давление в трубопроводе после задвижки до ее открытия и в начальный момент после ее открытия, P_1 – давление в трубопроводе за задвижкой после ее открытия, ρ_{1H} – плотность газа в трубопроводе при начальном давлении. Давление P_1 в трубопроводе (за задвижкой) после открытия задвижки зависит от степени открытия задвижки и не всегда достигает давления газа P_{1M} в трубопроводе до задвижки.

Давление фронта ударной волны с учетом уравнения (9) в этом случае можно определить из выражения вида [2]

$$P_{1Y} = P_1 + \frac{2L}{t_3} \rho_{1H} \left(\frac{P_1}{P_{1H}} \right)^{\frac{1}{n}} W_1, \quad (10)$$

где L – длина трубопровода от задвижки до объекта испытывающего газовый удар; t_3 – время открытия задвижки; P_{1Y} – давление газа перед фронтом ударной волны; P_1 – давление газа за фронтом ударной волны; W_1 – скорость движения газа за фронтом ударной волны после открытия задвижки, которая определяется из выражения

$$W_1 = \frac{1}{\sqrt{1+\xi}} \sqrt{\frac{2nRT_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{P_{1H}}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}, \quad (11)$$

где P_1 – давление в трубопроводе за задвижкой после ее открытия и определяется степенью открытия задвижки $P_1 < P_{1M}$, ξ – коэффициент местных потерь задвижки.

Рассмотрим второй вариант, когда плотность газа ρ_{1Y} в процессе удара не является величиной постоянной и зависит от изменения давления за фронтом ударной волны P_{1Y} . В этом случае плотность газа за фронтом ударной волны с учетом политропного процесса можно определить из уравнения:

$$\rho_{1Y} = \rho_1 \left(\frac{P_{1Y}}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (12)$$

Подставим плотность газа ρ_{1Y} из выражения (12) вместо ρ_1 в уравнение (10) и получим

$$P_{1Y} = P_1 + \frac{2L\rho_1}{t_3} \left(\frac{P_{1Y}}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} W_1, \quad (13)$$

где W_1 – скорость движения газа за фронтом ударной волны, которая определяется из выражения (11), а плотность газа ρ_1 находим из выражения (9).

Преобразуем выражение (13) относительно P_{1Y} и получим уравнение вида:

$$t_3 P_1^{\frac{1}{n}} P_{1Y} - 2L\rho_1 W_1 P_{1Y}^{\frac{1}{n}} - t_3 P_1^{\frac{1}{n}} P_1 = 0. \quad (14)$$

Уравнение (14) приводится к следующему выражению

$$A_1 P_{1Y} - B_1 P_{1Y}^{\frac{1}{n}} - C_1 = 0, \quad (15)$$

где $A_1 = t_3 P_1^{\frac{1}{n}}$; $B_1 = 2L\rho_1 W_1$; $C_1 = t_3 P_1^{\frac{1}{n}} P_1$.

Для предотвращения газового удара необходимо время открытия (закрытия) газовых задвижек увеличивать. Расчеты давления фронта ударной волны в трубопроводе в этом случае необходимо рассчитывать по уравнениям (10) и (15) с учетом выражений (9) и (11).

На рисунке 2 изображены результаты математического моделирования повышения давления в трубопроводе при прямом газовом ударе, т.е. когда время открытия задвижки меньше времени удвоенной фазы или одного периода (цикла) распространения ударной волны $t_3 < t_\phi$ (реальным временем открытия задвижки $t_3 = 0,1 \dots 0,4$ с). Вычисления производились для давлений в трубопроводе до открытия задвижки $P_{1M} = 0,4; 0,8; 1,2; 1,6; 2,0$ МПа. Расчеты производились для одного варианта, когда плотность газа до и после фронта ударной волны оставалась постоянной, и в этом случае применялось уравнение (3), и для варианта, когда плотность газа перед фронтом ударной волны изменялась, и вычисления велись с помощью выражения (8).

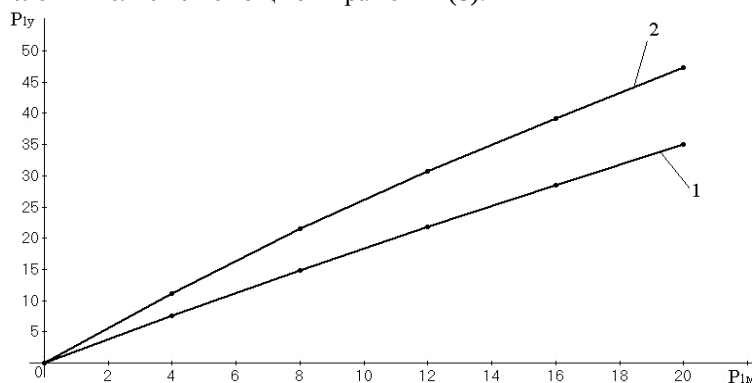


Рисунок 2 – Скачок давления в трубопроводе при прямом газовом ударе и быстром открытии задвижки: 1 – прямой газовый удар постоянная плотность газа; 2 – прямой газовый удар переменная плотность газа

Как показывает графическая зависимость 1 на рисунке 2, при прямом газовом ударе, скачкообразное возрастание давления по сравнению с давлением в трубопроводе до открытия задвижки, возрастает после ее быстрого открытия в 1,75 1,88 раза. График 2, который учитывает увеличение плотности газа по закону ударной адиабаты, показанный на том же рисунке характеризует возрастание давления в 2,36....2,77 раза по сравнению с подаваемым давлением газа в трубопроводе.

Экспериментальные исследования на сжатом воздухе показывают, что резкое возрастание давления происходит на 10...15 % ниже кривой 2 и значительно выше кривой 1.

На рисунке 3 изображены графики зависимости увеличения давления P_{1y} от подаваемого давления в газопроводе до открытия задвижки $P_{1M} = 0,4; 0,8; 1,2; 1,6; 2,0$ МПа с учетом времени открытия задвижки от 0,5 до 10 секунд, при постоянной плотности газа. Для вычислений использовались выражения (10) и (15).

На рисунке 4 показаны аналогичные зависимости для тех же параметров, что и на рисунке 3, но для переменной плотности газа.

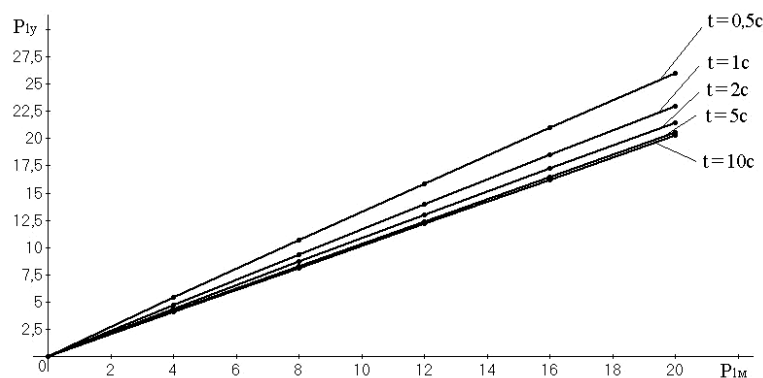


Рисунок 3 – Скачок давления в трубопроводе в зависимости от времени открытия задвижки при непрямом ударе и постоянной плотности газа

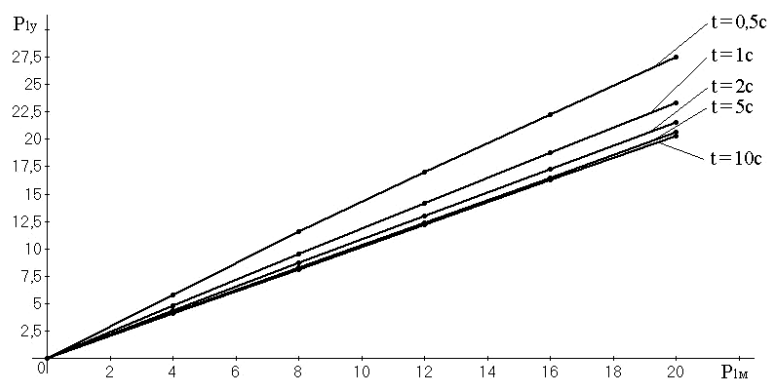


Рисунок 4 – Скачок давления в трубопроводе в зависимости от времени открытия задвижки при непрямом ударе и переменной плотности газа

Анализ графических зависимостей, изображенных на рисунках 3 и 4 показывает, что для непрямого газового удара и времени открытия задвижки 0,5 с, для постоянной плотности газа давление в трубопроводе возрастает в 1,3...1,35 раза, а для переменной плотностью газа в 1,37...1,46 раза, по сравнению с давлением газа подаваемого в трубопровод. При времени открытия задвижки свыше 2 секунд давление при газовом ударе возрастает на 3...10 % по сравнению с давлением подаваемого газа, как для постоянной, так и для переменной плотности газа. Расчеты велись для диаметров трубопроводов 100 мм и длине после задвижки и до регулятора давления $L = 30$ м.

Как показывают результаты математического моделирования и экспериментальные исследования, для управления автоматическими задвижками (особенно в момент их открытия), и с целью предотвращения резкого повышения давления, следует учитывать, явление газового удара в газопроводе с помощью зависимостей (8) и (15). Эти зависимости, наиболее полно отражают реальные физические процессы, происходящие в газопроводах ГРС, и дают возможность предотвращать поломки газового оборудования и аварийные ситуации.

Библиографический список

1. Некрасов Б.Б. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Б.Б. Некрасов, Я.М. Вильнер, Я.Т. Ковалев — 2-е изд., перераб. и доп. — Минск: Выш. шк., 1985. — 382 с.
2. Дмитриев В.Н. Основы пневмоавтоматики / В.Н. Дмитриев, В.Г. Градецкий — М.: Машиностроение, 1973. — 360 с.
3. Шушляпин Е.А. Влияние газового удара на процесс открытия и закрытия газовых задвижек / Е.А. Шушляпин, В.П. Поливцев, В.В. Поливцев // Оптимизация производственных процессов: сб. науч. тр. — Севастополь, 2009. — Вып. 11 — С. 60–63.
4. Моль Р. Гидропневмоавтоматика / Р. Моль: пер. с франц. — М.: Машиностроение, 1975. — 352 с.

Поступила в редакцию 14.10.2009 г.