

УДК 621.757.007.52

Е.А. Шушляпин, профессор, д-р техн. наук**В.П. Полищев, доцент, канд. техн. наук,****В.В. Полищев, инженер***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина. 99053***ВЛИЯНИЕ ГАЗОВОГО УДАРА НА ПРОЦЕСС ОТКРЫТИЯ И ЗАКРЫТИЯ ГАЗОВЫХ ЗАДВИЖЕК**

Представлена модель газового удара в трубопроводах. Разработаны законы управления приводами газовых задвижек для безопасной эксплуатации газораспределительных станций в автоматическом режиме.

Автоматизация газораспределительных станций (ГРС) в газовом комплексе Украины приобретает все более актуальное значение и решается путем дистанционного автоматического управления. Газовые задвижки открываются и закрываются автоматически от быстродействующих газовых или пневматических приводов. Автоматическое открытие и закрытие газовых задвижек в силу их быстродействия за счет применяемых на ГРС пневматических приводов требует учитывать, что в газопроводах может происходить газовый удар, который повреждает различное газовое оборудование. Газовый удар – это явление, аналогичное гидравлическому удару, и характеризуется резким изменением давления в магистрали при внезапном изменении скорости движения газа, связанном с быстрым закрытием или открытием задвижки клапана. При нарастании давления – это положительный газовый удар при уменьшении давления – отрицательный. Удар может быть полным, когда происходит полный останов движения газа при ударе о препятствие и неполный, когда скорость газа изменяется до некоторого значения.

Удар может быть прямым (при быстром закрытии или открытии задвижки) и не прямым (при медленном перекрытии или открытии задвижки). Наиболее опасным является положительный полный прямой удар газа, при котором в первую очередь выходят из строя измерительные устройства, другая аппаратура, задвижки и даже может произойти разрыв трубопровода. Целью данной работы является разработка математической модели для управления приводами газовых задвижек с учетом явления газового удара в трубопроводах для безопасной эксплуатации ГРС.

Изменение давления распространяется по всей длине трубопровода L с большой скоростью C , называемой скоростью распространения фронта ударной волны (рисунок 1). Величина C скорости распространения фронта «газовой» ударной волны определяется по формуле [1]

$$C = \sqrt{\frac{nRT}{\rho}}, \quad (1)$$

где n – показатель политропного процесса, R – универсальная газовая постоянная для природного газа, T – температура природного газа, ρ – плотность природного газа.

Величина C не может превышать скорости распространения звука в природном газе.

Повышение давления при (положительном) прямом газовом ударе можно определить по формулам Н.Е. Жуковского для жидкости [2]:

$$\text{при полном ударе } \Delta p = \rho_1 C W_0; \quad (2)$$

$$\text{при неполном ударе } \Delta p = \rho_1 C (W_0 - W), \quad (3)$$

где W_0 – скорость движения газа по трубопроводу за фронтом ударной волны; W – скорость газа после газового удара; ρ_1 – плотность газа при давлении P_{M1} в газопроводе за фронтом ударной волны в момент удара (рисунок 1).

Повышение давления при (положительном) непрямом газовом ударе можно определить по формулам:

$$\text{при полном ударе } \Delta p = \frac{\rho_1 2LW_0}{t_3}, \quad t_3 < t_\phi; \quad (4)$$

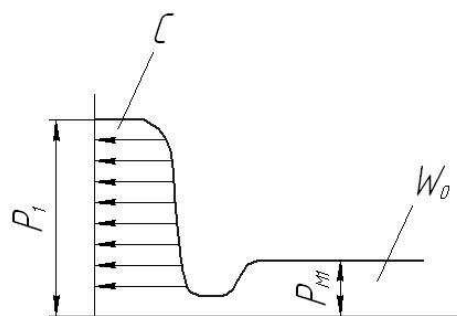


Рисунок 1 – Фронт распространения газовой ударной волны в трубопроводе

$$\text{при неполном ударе } \Delta p = \frac{\rho_1 2L(W_0 - W)}{t_3}, \quad t_3 > t_\phi, \quad (5)$$

где t_3 – время срабатывания задвижки; t_ϕ – длительность фазы (период) распространения ударной волны, L – длина газового трубопровода, по которому распространяется ударная волна.

Полное давление при ударе газа о препятствие (рисунок 1) равно давлению газа за фронтом ударной волны, плюс скачек давления по формулам (2) – (5).

$$P_1 = P_{M1} + \Delta P.$$

Удвоенная фаза или один период (цикл) ударной волны t_ϕ определяется зависимостью:

$$t_\phi = 2L/C. \quad (6)$$

Газ по сравнению с жидкостью – сжимаемая среда, и плотность газа с повышением давления увеличивается. Найдем зависимость изменения плотности природного газа в зависимости от изменения давления для общего случая – политропного процесса [3].

Используя уравнение политропы $\frac{P_{M1}}{\rho_{M1}^n} = \frac{P_M}{\rho_M^n}$, уравнение состояния газа $P_M V = mRT_M$ и плотности

газа $\rho = m/V$, получаем окончательное значение плотности при политропном процессе в виде:

$$\rho_{M1} = \rho_M \left(\frac{P_{M1}}{P_M} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (7)$$

где ρ_{M1}, ρ_M – текущее значение плотности газа при давлении газа в трубе P_{M1} после задвижки и плотность газа при давлении в магистрали P_M до задвижки; V – объем газа, m – масса газа; R – универсальная газовая постоянная; T_M – температура газа в магистрали; n – показатель политропного процесса.

Определим скорость движения газа в трубе W_0 (после открытия задвижки) в процессе удара с помощью уравнения Бернулли, записанного в следующем виде [3]

$$\frac{W_0^2}{2} + \frac{n}{n+1} \left(\frac{P_{M1}}{\rho_{M1}} - \frac{P_M}{\rho_M} \right) + \xi \frac{W_0^2}{2} = 0, \quad (8)$$

где ξ – коэффициент местного сопротивления.

Решим уравнение (8) относительно W_0 и получим зависимость

$$W_0 = \frac{1}{\sqrt{1+\xi}} \sqrt{\frac{2n}{n-1} \left(\frac{P_{M1}}{\rho_{M1}} - \frac{P_M}{\rho_M} \right)}. \quad (9)$$

С учетом политропного процесса для соотношения давлений, плотности газа и уравнения состояния газа, приведенных выше, а также выражения (9), получаем формулу скорости в виде:

$$W_0 = \frac{1}{\sqrt{1+\xi}} \sqrt{\frac{2nRT}{n-1} \left[1 - \left(\frac{P_{M1}}{P_M} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]} \quad (10)$$

В зависимости от скорости срабатывания и степени открытия (перекрытия) задвижки запорный элемент регулятора испытывает давление прямого полного удара (зависимость (2)) или непрямого полного удара, описываемого зависимостью (4). Если подставить ρ_{M1} из выражения (7), то с учетом (2), (4) и (10) получим:

для прямого полного удара

$$\Delta P = C \rho_M \left(\frac{P_{M1}}{P_M} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{1}{\sqrt{1+\xi}} \sqrt{\frac{2nRT}{n-1} \left[1 - \left(\frac{P_{M1}}{P_M} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}; \quad (11)$$

для непрямого полного удара

$$\Delta P = \frac{2L\rho_M}{t_3} \left(\frac{P_{M1}}{P_M} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{1}{\sqrt{1+\xi}} \sqrt{\frac{2nRT}{n-1} \left[1 - \left(\frac{P_{M1}}{P_M} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}. \quad (12)$$

Измерительная система давления и расхода газа через трубопровод показанная на рисунке 1, испытывают прямой неполный удар и непрямой неполный удар, описываемый формулами (3), (5). Аналогично в формулы (3), (5) подставим p_{M1} из выражения (7) и скорость W_0 из выражения (10) и получим следующие зависимости:

для прямого неполного удара

$$\Delta P = C p_M \left(\frac{P_{M1}}{P_M} \right)^{\frac{1}{n}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1+\xi}} \sqrt{\frac{2nRT}{n-1} \left[1 - \left(\frac{P_{M1}}{P_M} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]} - W \right\}; \quad (13)$$

для непрямого неполного удара

$$\Delta P = \frac{2L p_M}{t_3} \left(\frac{P_{M1}}{P_M} \right)^{\frac{1}{n}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1+\xi}} \sqrt{\frac{2nRT}{n-1} \left[1 - \left(\frac{P_{M1}}{P_M} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]} - W \right\}. \quad (14)$$

В формуле (10) следует учитывать, что скорость распространения ударной волны (скорость течения газа) не может превышать скорости звука и зависит от некоторого критического значения соотношения давлений $\beta_{KP} = P_{M1}/P_M$. Критическое значение давлений определяется из соотношения [3]:

$$\beta_{KP} = \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n}{n-1}}. \quad (15)$$

При $P_{M1}/P_M < \beta_{KP}$ скорость течения газа близка к скорости звука, а критическое соотношение давлений определяется формулой (15). При $P_{M1}/P_M > \beta_{KP}$ скорость ударной волны рассчитывается по формуле (10), т.е. в выражениях (11) – (14) следует учитывать критическое соотношений давлений до задвижки и после задвижки из выражения (15).

Скорость открытия и площадь открытого сечения задвижки 2 определяют значение давления P_{M1} после задвижки и скорость течения газа W_0 (скорость распространения ударной волны) по отрезку трубопровода до газового регулятора давлений 5 (рисунок 1).

Для определения массового расхода газа G , проходящего через шаровую задвижку 2, воспользуемся формулой Сен-Венана Ванцеля для докритического истечения газа [3]

$$G = \mu S_3 P_M \sqrt{\frac{2n}{RT(n-1)} \left[\left(\frac{P_{M1}}{P_M} \right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{P_{M1}}{P_M} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right]}, \quad P_{M1}/P_M > \beta_{KP}, \quad (16)$$

где μ – коэффициент расхода; S_3 – площадь открытия окна задвижки; P_M, P_{M1} – давления газа до и после задвижки. Надкритическое истечение газа не рассматриваем, так как скорость движения газа после задвижки не может превышать скорость звука, скорости распространения звука $a_{зв}$ в газе.

Коэффициент расхода определяется из выражения:

$$\mu = \frac{Z}{\sqrt{1+\xi}},$$

где Z – коэффициент сжатия струи газа после прохождения окна задвижки; ξ – коэффициент местных потерь в задвижке.

Считая, что расход газа, подводимый к задвижке, является величиной постоянной на определенном отрезке времени (в момент открытия задвижки) и известным преобразуем выражение (16) относительно P_{M1} и запишем в виде:

$$A(P_{M1})^{n+1} + B(P_{M1})^2 - C = 0, \quad (17)$$

здесь

$$A = -\frac{1}{(P_M)^{n+1}}, \quad B = \frac{1}{(P_M)^2}, \quad C = \left(\frac{G^2 RT [n-1]}{\mu^2 S_3^2 2n} \right)^n (P_M)^{2n}.$$

Решая уравнение (17), находим давление P_{M1} после открытия задвижки.

Давление P_{M1} в уравнении (17) значительной степени зависит от площади S_3 открытия окна и времени t_3 срабатывания задвижки. Время срабатывания задвижки определяется законом движения штока цилиндра привода задвижки, а площадь открытия окна – геометрической характеристикой,

зависящей от конструкции и величины перемещения запорной части задвижки. В газовой отрасли часто встречаются задвижки с шаровой запорной частью. Открытие (закрытие) площади окна такой задвижки представлено на рисунке 2. Максимальная площадь открытия окна (задвижка полностью открыта) равна:

$$S_3 = \pi r^2.$$

Минимальная площадь окна соответствует $S_3 = 0$ (задвижка полностью закрыта). Промежуточные положения запорной части шаровой задвижки и площади окна определяются зависимостью вида

$$S_3 = r_1 \left(\frac{\pi \alpha_1^\circ}{180^\circ} - \sin \alpha_1^\circ \right) + r_2 \left(\frac{\pi \alpha_2^\circ}{180^\circ} - \sin \alpha_2^\circ \right) \quad (18)$$

где r_1 – радиус окна запорной части шаровой задвижки, r_2 – радиус пропускной части корпуса задвижки, $\alpha_1^\circ, \alpha_2^\circ$ – центральный угол (градусах) образования сегментов площади окна задвижки, которые находят из выражений вида:

$$\alpha_1^\circ = 2 \arccos \frac{r_1 - h_1}{r_1},$$

$$\alpha_2^\circ = 2 \arccos \frac{r_2 - h_2}{r_2}.$$

Здесь h_1, h_2 – стрелки сегментов площади окна задвижки $x = h_1 + h_2$; x – перемещение запорной части от привода задвижки; $h_1/h_2 = r_1/r_2$.

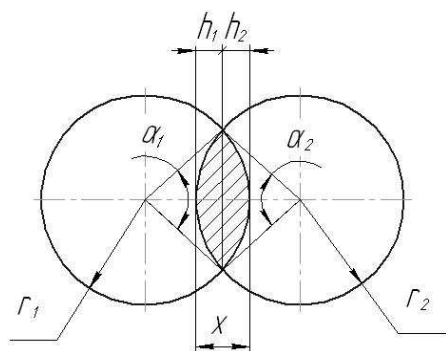


Рисунок 2 – Площадь перекрытия окна шаровой задвижки

При известном законе управления приводом задвижки (величиной перемещения x , скоростью перемещения $\dot{x}$, а следовательно, и временем открытия t_3) можно для газового регулятора давления получить не прямой полный, а для измерительной аппаратуры – не прямой неполный газовый удар, которые позволяют снизить (или совсем исключить) вероятность повреждения регулируемой, запорной арматуры и измерительной аппаратуры практически к минимуму.

Используя выражения (12), (17) и (18) или (14), (17) и (18) можно получить необходимый закон управления задвижкой (при закрытии t_3 , открытии t_0) для безопасной эксплуатации регулируемой, запорной арматуры и измерительной аппаратуры на газораспределительных станциях. Выражения (11) и (13) могут быть использованы

для случаев, когда задвижка открывается или закрывается полностью и время открытия и закрытия задвижки для практических случаев $t_3 < 0,1 \dots 0,5$ с. В этом случае происходит прямой газовый удар, а скорость распространения ударной волны по газопроводу может достигать скорости распространения звука в газовой среде и такой режим работы не гарантирует безопасную эксплуатацию на ГРС. Такой режим может быть использован при расчетах запасов прочности трубопроводов, регуляторов давления, запорных задвижек и другой газовой аппаратуры.

Конкретные особенности коммуникаций, применяемой измерительной аппаратуры на ГРС, позволяет с помощью предложенной модели учитывать эти особенности, подбирать необходимый закон управления приводом задвижки для безопасного режима ее открытия или закрытия на газовой магистрали. Для дальнейших исследований требуется подтверждение адекватности разработанной модели управления приводами задвижек с реальными экспериментальными данными.

Библиографический список

1. Юренев В.Н. Теплотехнический справочник: Т. 1. / В.Н. Юренев, П.Д. Лебедев. — М.: Энергия, 1975. — 744 с.
2. Некрасов Б.Б. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам: 2-е изд., перераб. и доп. / Б.Б. Некрасов, Я.М. Вильнер, Я.Т. Ковалев. — Минск: Вышей. шк., 1985. — 382 с.
3. Дмитриев В.Н. Основы пневмоавтоматики / В.Н. Дмитриев, В.Г. Градецкий. — М.: Машиностроение, 1973. — 360 с.

Поступила в редакцию 11.07.2008 г.