

УДК 622.691

ТЕОРИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕФТЕПРОВОДАХ С СИСТЕМОЙ СГЛАЖИВАНИЯ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ

А.В. Адоевский
(РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, Москва)

Давление в нефтепроводе, система сглаживания волн давления, математическое моделирование

Pressure in the pipeline, pressure surge smoothing system, mathematical modeling

The theory for calculation of transient processes in pipelines equipped with PSSS. Adoevskiy A.V.

This article describes the study of functioning of a pipeline equipped with a pressure surge smoothing system (PSSS). PSSS is designed to reduce the amplitude of the pressure surge, which arises due to shutdown of one or more pump units at oil pumping station. Reducing the pressure surge amplitude is achieved by a partial discharge of oil from the main pipeline into the relief tank. In contrast to the relief valves PSSS responses not so much to the absolute value of pressure, but rather to its rate increase. This article discusses the mathematical modeling of performance of the pipeline equipped with a PSSS. It is concluded that the use of a relief valve with a constant flow coefficient leads to the unsteady operation of PSSS. The calculations of operation of PSSS in combination with the valve, the flow coefficient of which is a function of pressure drop between the valve cavities, showed that PSSS smoothes pressure surges and works steadily if it is adjusted correctly. Fig.4, ref. 1.

Система сглаживания волн давления (ССВД) предназначена для уменьшения амплитуды волны давления, возникающей в случае отключения одного или нескольких насосов на нефтеперекачивающей станции (НПС). Уменьшение амплитуды волны давления достигается частичным сбросом нефти из трубопровода в сбросную емкость. В отличие от предохранительных клапанов, ССВД реагируют не столько на абсолютную величину давления, сколько на скорость его увеличения. Рассматривается математическое моделирование работы нефтепровода с установленной на нем ССВД. Приводится формулировка соответствующей математической задачи, дается метод ее численного решения, обсуждаются полученные результаты.

Схема и принцип действия ССВД. Принципиальная схема ССВД представлена на рис. 1. ССВД состоит из двух функциональных частей: сбросного устройства и системы управления.

В состав сбросного устройства входит клапан 4 для сброса нефти в емкость 5. Одна из полостей клапана свободно сообщается с газовым аккумулятором, другая – с внутренней полостью нефтепровода (см. рис. 1). Если давление в нефтепроводе превышает давление в газовой полости на некоторую задаваемую величину, то клапан открывается и начинается сброс нефти в резервуар; в противном случае клапан закрыт, и сброс нефти не происходит. Степень открытия клапана зависит от разности давлений между полостями клапана, причем, чем эта разность больше, тем больше степень открытия. Каждой степени открытия клапана соответствует свой коэффициент расхода K .

Поскольку давление в газовом аккумуляторе изменяется не сразу, а постепенно, то между полостями клапана возникает разность давлений, изменение которой зависит от параметров управляющей системы. Управляющая система

Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

ССВД состоит из разделительной емкости 1, регулируемого дросселя 2 и газового аккумулятора 3. Разделительная емкость свободно сообщается с нефтепроводом и предназначена для того, чтобы в управляющую систему ССВД поступала не нефть, а другая, разделительная жидкость, например, диэтиленгликоль. Дроссель регулирует подачу диэтиленгликоля в газовый аккумулятор и, следовательно, регулирует скорость изменения давления в нем.

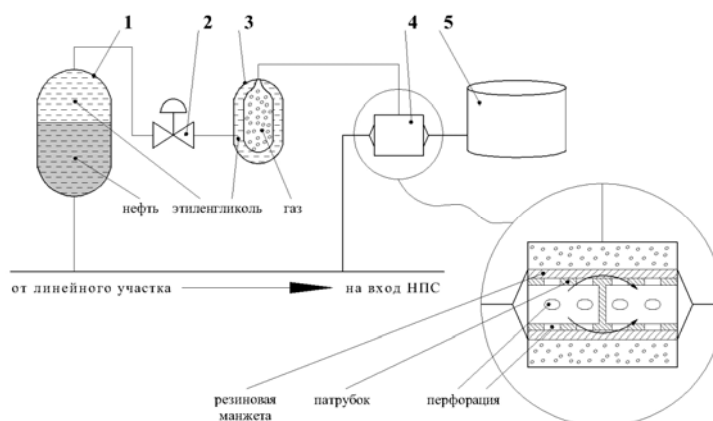


Рис. 1. Принципиальная схема ССВД

Система работает следующим образом. При увеличении давления в нефтепроводе, разделительная жидкость начинает поступать в газовый аккумулятор. Газ в аккумуляторе ССВД плавно сжимается, следовательно, постепенно возрастает давление в газовой полости клапана. Если давление в нефтепроводе увеличивается плавно, то разность давлений в полостях клапана не превышает величину, необходимую для его открытия, и клапан остается закрытым. Если же давление в нефтепроводе увеличивается быстро, то разность давлений в полостях клапана может превысить установленную величину, поэтому клапан откроется. Поскольку давление в газовом аккумуляторе постепенно возрастает из-за попадания в него разделительной жидкости, то возрастает давление в газовой полости клапана, перепад давления между его полостями постепенно уменьшается, и клапан начинает плавно прикрываться. Закрытие клапана приводит к постепенному снижению расхода сброса нефти, происходит плавное торможение потока, поэтому давление в трубопроводе постепенно повышается. Наконец, давление в газовом аккумуляторе увеличивается до такой степени, что оно будет соответствовать пороговому перепаду давлений между полостями клапана, и последний закрывается.

Таким образом, ССВД устроена так, что сбросной клапан быстро открывается и плавно закрывается, тем самым обеспечивая плавное изменение давления в трубопроводе.

Моделирование нефтепровода. Для описания нестационарного течения однородной несжимаемой жидкости используется следующая система дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 c^2 \cdot \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \\ \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = -\lambda(\text{Re}, \varepsilon) \frac{1}{d_0} \frac{\rho_0 v |v|}{2} - \rho_0 g \sin \alpha(x); \end{cases} \quad (1)$$

Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

где использованы общепринятые обозначения [1]. Для решения данной системы уравнений используется метод характеристик.

Для моделирования трубопровода используется следующая система уравнений:

$$\begin{cases} p_M + \rho_0 c \cdot v_M = p_A + \rho_0 c \cdot v_A - \Delta t \cdot \left[\lambda \frac{\rho_0 c v_A |v_A|}{2d} + \rho_0 c g \sin \alpha_A \right], \\ p_M - \rho_0 c \cdot v_M = p_B - \rho_0 c \cdot v_B + \Delta t \cdot \left[\lambda \frac{\rho_0 c v_B |v_B|}{2d} + \rho_0 c g \sin \alpha_B \right]; \end{cases} \quad (2)$$

где индекс M означает, что значение соответствует моменту времени t и сечению x ; индекс A – моменту времени $(t - \Delta t)$ и сечению $(x - \Delta x)$; индекс B – моменту времени $(t - \Delta t)$ и сечению $(x + \Delta x)$.

Для моделирования НПС в сечении, где она установлена, должно выполняться следующее условие совместимости:

$$\begin{cases} p_M^- + \rho_0 c \cdot v_M = p_A + \rho_0 c \cdot v_A - \Delta t \cdot \left[\lambda \frac{\rho_0 c v_A |v_A|}{2d} + \rho_0 c g \sin \alpha_A \right], \\ p_M^+ - \rho_0 c \cdot v_M = p_B - \rho_0 c \cdot v_B + \Delta t \cdot \left[\lambda \frac{\rho_0 c v_B |v_B|}{2d} + \rho_0 c g \sin \alpha_B \right], \\ \frac{p_M^+ - p_M^-}{\rho_0 g} = N \cdot \left[\left(\frac{n}{n_0} \right)^2 \cdot A - B (v_M / S)^2 \right], \end{cases} \quad (3)$$

где p_M^- – давление на входе НПС, а p_M^+ – давление на выходе; N – количество работающих насосов; n – значение частоты вращения рабочего колеса насоса в текущий момент времени t ; n_0 – номинальная частота вращения рабочего колеса насоса; A и B – коэффициенты аппроксимации Q-H характеристики насоса.

Для моделирования остановки промежуточной НПС частота вращения на всех работающих насосах n определяется следующим образом:

$$n = \begin{cases} n_0, & t < t_{HO}, \\ n_0 \left(1 - \frac{t - t_{HO}}{t_{OCT}} \right), & t > t_{HO}, \\ 0, & t > t_{HO} + t_{OCT}; \end{cases} \quad (4)$$

где t_{HO} – момент начала остановки НПС; t_{OCT} – время остановки НПС. Обратное течение через НПС недопустимо, поэтому на выходе каждой насосной станции установлен обратный клапан. Если в результате расчетов по приведенным выше уравнениям скорость нефти через НПС $v_M < 0$, то принимаем $v_M = 0$.

Для определения значений давления и скорости нефти в граничных сечениях трубопровода необходимо использовать краевые условия.

Для начального сечения справедлива система:

Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

$$\begin{cases} p_M - \rho_0 c \cdot v_M = p_B - \rho_0 c \cdot v_B + \Delta t \cdot \left[\lambda \frac{\rho_0 c v_B |v_B|}{2d} + \rho_0 c g \sin \alpha_B \right]; \\ p_M = p_0. \end{cases} \quad (5)$$

Для конечного сечения справедлива система:

$$\begin{cases} p_M + \rho_0 c \cdot v_M = p_A + \rho_0 c \cdot v_A - \Delta t \cdot \left[\lambda \frac{\rho_0 c v_A |v_A|}{2d} + \rho_0 c g \sin \alpha_A \right]; \\ p_M = p_K. \end{cases} \quad (6)$$

Моделирование ССВД. ССВД состоит из системы управления и сбросного устройства.

Для описания работы системы управления ССВД используем систему алгебраических и дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} q_{жс} = \kappa \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |p_M - p_{КЛ}|}{\rho_{жс}}} \cdot \text{sign}(p_M - p_{КЛ}); \\ \frac{dV}{dt} = -q_{жс}; \\ \frac{d(p_{КЛ} \cdot V)}{dt} = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где первое уравнение этой системы определяет зависимость расхода $q_{жс}$ разделительной жидкости от перепада $p_M - p_{КЛ}$ давлений на дросселе, второе – динамику изменения газового объема в газовом аккумуляторе, третье – закон изотермического сжатия. Здесь κ – коэффициент сопротивления дросселя; $V, p_{КЛ}$ – текущий объем и давление газа в газовом аккумуляторе; $\rho_{жс}$ – плотность разделительной жидкости; sign – знак ($\text{sign}(p_M - p_{КЛ}) = 1$, если $(p_M - p_{КЛ}) \geq 0$ и $\text{sign}(p_M - p_{КЛ}) = -1$, если $(p_M - p_{КЛ}) < 0$).

Поскольку

$$\frac{d(p_{КЛ} \cdot V)}{dt} = p_{КЛ} \frac{dV}{dt} + V \frac{dp_{КЛ}}{dt} = 0,$$

то, заменив производную dV/dt расходом $q_{жс}$ разделительной жидкости и выразив текущий объем V через текущее давление в аккумуляторе $p_{КЛ}$ и его начальные объем V_0 и давление p_0 , получим дифференциальное уравнение:

$$\frac{dp_{КЛ}}{dt} = \frac{p_{КЛ}^2 \cdot \kappa}{p_0 V_0} \cdot \sqrt{\frac{2 |p_M - p_{КЛ}|}{\rho_{жс}}} \cdot \text{sign}(p_M - p_{КЛ}), \quad (8)$$

связывающее текущее давление $p_{КЛ}$ газа в газовом аккумуляторе с текущим давлением p_M нефти в нефтепроводе.

Для описания работы сбросного устройства ССВД используем систему алгебраических уравнений:

Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

$$\begin{cases} q_C = K \cdot \sqrt{\frac{p_M}{\rho_0}}; \\ q^- - q^+ = q_C. \end{cases} \quad (9)$$

Первое уравнение этой системы определяет зависимость расхода сброса нефти через клапан ССВД q_C от текущего давления в трубопроводе p_M и коэффициента расхода клапана K . Коэффициент K клапана может иметь постоянное значение и являться функцией от перепада $p_M - p_{КЛ}$ давлений между полостями клапана. Второе уравнение этой системы является уравнением баланса расходов. Здесь q^- – расход до ССВД; q^+ – расход после ССВД.

Таким образом, для моделирования ССВД в сечении, где оно установлено, должно выполняться следующее условие совместимости:

$$\begin{cases} p_M + \rho_0 c \cdot v_M^- = p_A + \rho_0 c \cdot v_A - \Delta t \cdot \left[\lambda \frac{\rho_0 c v_A |v_A|}{2d} + \rho_0 c g \sin \alpha_A \right], \\ p_M - \rho_0 c \cdot v_M^+ = p_B - \rho_0 c \cdot v_B + \Delta t \cdot \left[\lambda \frac{\rho_0 c v_B |v_B|}{2d} + \rho_0 c g \sin \alpha_B \right], \\ q_C = K \cdot \sqrt{\frac{p_M}{\rho_0}}, \\ q^- - q^+ = q_C, \\ \frac{dp_{КЛ}}{dt} = \frac{p_{КЛ}^2 \cdot \kappa}{\rho_0 V_0} \cdot \sqrt{\frac{2|p_M - p_{КЛ}|}{\rho_{ж}}} \cdot \text{sign}(p_M - p_{КЛ}). \end{cases} \quad (10)$$

Выбор параметров сбросного устройства ССВД. Чтобы ССВД выполняло свои функции – сглаживало волну давления и обеспечивало скорость нарастания давления в диапазоне $0,01 - 0,03 \text{ МПа/с}$, его параметры должны быть выбраны определенным образом. В отдельных случаях неправильно выбранные параметры ССВД приведут к небезопасному режиму работы, при котором есть опасность разрушения самого ССВД и присоединенных к нему трубопроводов. Рассмотрим выбор параметров сбросного устройства ССВД. Для этого положим, что параметры системы управления ССВД выбраны так, что при правильном выборе параметров сбросного устройства, ССВД поддерживает заданную скорость роста давления.

Единственным параметром сбросного устройства является коэффициент расхода клапана K . Рассмотрим случай, когда он является постоянной величиной. На рис. 2 представлено изменение давления на входе и выходе НПС при ее остановке черная и серая линии соответственно. На входе НПС установлено ССВД. Для случая, представленного (см. рис. 2а) коэффициент расхода клапана K равен 0,1, а (см. рис. 2б) – 10000.

В обоих случаях происходят колебания давления (см. рис.2). После остановки НПС давление на входе начинает возрастать, оно превышает настроечное давление клапана на заданную величину, необходимую для открытия клапана. Так как коэффициент расхода клапана постоянный, то клапан откроется полностью, нефть начнет сбрасываться в емкость. Полное открытие клапана приведет к резкому падению давления на входе НПС, и оно снизится ниже уровня,

Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

который необходим для открытия клапана, поэтому произойдет его закрытие. Далее давление вновь начинает повышаться, процесс повторяется, принимая в дальнейшем колебательный характер. Возникающие колебания в ССВД могут привести к разрушению самого устройства и присоединенных к нему трубопроводов.

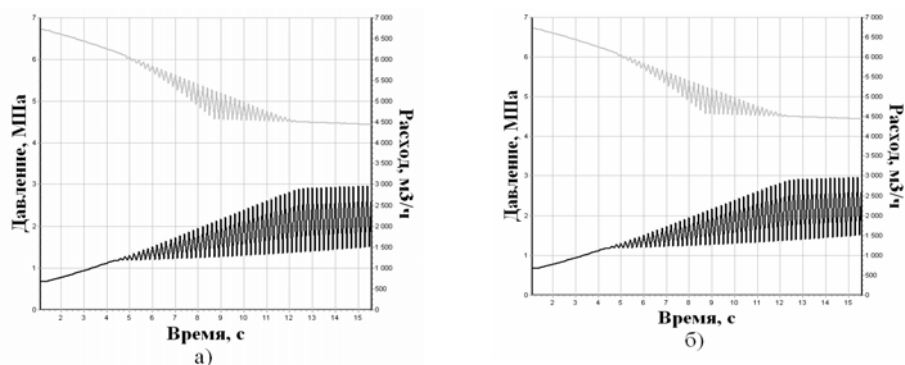


Рис. 2. Изменение давления на входе и выходе НПС с ССВД при постоянном коэффициенте расхода клапана

Рассмотрим случай, когда коэффициент расхода клапана является функцией от перепада $p_M - p_{КЛ}$ давлений между полостями клапана, например, существует линейная зависимость:

$$K = \gamma \cdot (p_M - p_{КЛ}), \quad (11)$$

где γ – коэффициент, отвечающий за угол наклона функции к оси перепада давлений.

На рис. 3 представлено изменение давления на входе и выходе НПС черная и серая линии соответственно. На входе НПС установлено ССВД. Клапан ССВД в данном случае имеет линейную зависимость коэффициента расхода от перепада давлений между его полостями. Для (см. рис. 3а) $\gamma = 1,0 \cdot 10^{-6}$, а для (см. рис. 3б) $\gamma = 1,0 \cdot 10^6$.

Скорость роста давления в первые 13 с равна $0,2 \text{ МПа} / \text{с}$ (см. рис. 3а). По причине малого значения коэффициента γ ССВД не сглаживает волну давления. При превышении давления на входе НПС выше настроенного на заданную величину, клапан открывается, но в данном случае настолько, что расход сброса, осуществляемый через него, очень мал. Такой расход сброса не может обеспечить сглаживание волны давления.

Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

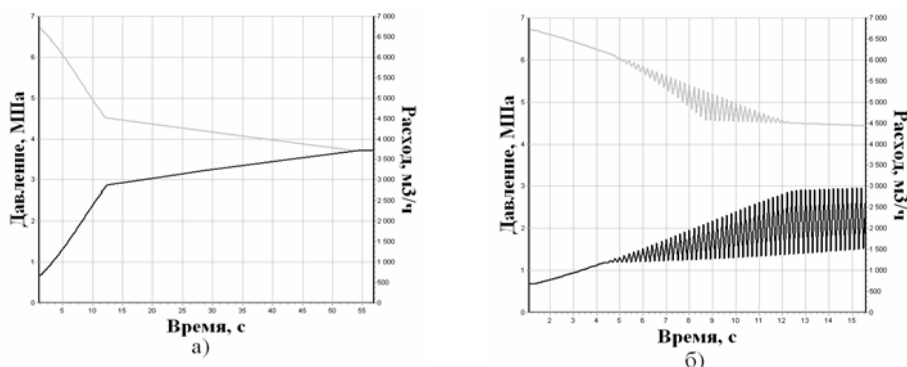


Рис. 3. Изменение давления на входе и выходе НПС с ССВД при линейной зависимости коэффициента расхода от перепада давлений между полостями клапана

При срабатывании ССВД происходит колебание давления на входе НПС (см. рис. 3б). Такие колебания возникают вследствие того, что взяты слишком большого значения коэффициента γ . Эта ситуация аналогична уже рассмотренной выше, где коэффициент K являлся постоянной величиной. Наблюдаемые колебания могут привести к разрушению ССВД и присоединенных к нему трубопроводов.

На рис. 4 представлено изменение давления на входе и выходе НПС черная и серая линии соответственно. На входе НПС установлено ССВД. Клапан ССВД в данном случае имеет линейную зависимость коэффициента расхода от перепада давлений между его полостями. Причем (см. рис. 4а) коэффициент $\gamma = 0,015$, а (см. рис. 4б) коэффициент $\gamma = 0,06$.

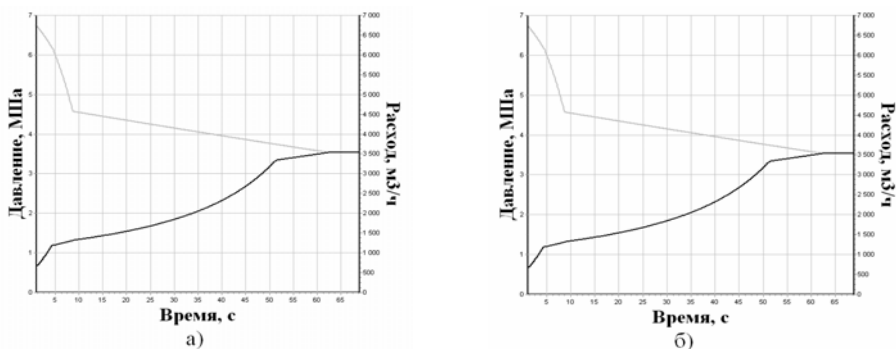


Рис. 4. Изменение давления на входе и выходе НПС с ССВД при линейной зависимости коэффициента расхода от перепада между полостями клапана

Скорость роста давления (см. рис. 4а) составляет $0,03 \text{ МПа} / \text{с}$, а (см. рис. 4б) – $0,01 \text{ МПа} / \text{с}$. В обоих случаях скорость роста давления лежит в заданном диапазоне $0,01 - 0,03 \text{ МПа} / \text{с}$, то есть ССВД выполняет свою функцию – сглаживает волну давления.

Выводы

Математическая модель нефтепровода совместно с ССВД состоит в систе-

Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

ме дифференциальных уравнений с частными производными для расчета давлений и расходов, с условиями сопряжения в виде обыкновенных дифференциальных уравнений, моделирующих работу ССВД.

Показано, что ССВД являются эффективным средством сглаживания волн давления в нефтепроводах, способных регулировать скорость увеличения давления в трубопроводе и тем самым предотвращать аварийные ситуации. Расчеты показали, что при использовании сбросного клапана, имеющего постоянное значение коэффициента расхода, ССВД работает неустойчиво. В клапане возникают осцилляции давления, которые могут привести к разрушению ССВД и присоединенных к нему трубопроводов.

Расчеты работы ССВД с клапаном, коэффициент расхода которого является линейной функцией от перепада давлений между его полостями, показал, что при правильной настройке ССВД работает устойчиво и выполняет назначенные ей функции.

Выявлен диапазон коэффициентов расхода, при которых ССВД обеспечивает скорость увеличения давления в нормативном диапазоне $0,01 - 0,03 \text{ МПа/с}$ скоростей.*

Список литературы

1. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. - М.: «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 2003, - 335 с.

Сведения об авторе

Адоевский А. В., аспирант кафедры «Проектирование и эксплуатация нефтегазопроводов», РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва, тел.: (499)233-95-02), e-mail: adoil@mail.ru

Adoevskiy A. V., postgraduate student of Department «Design and operation of oil and gas pipelines» RSU of Oil and Gas named after I.M. Gubkin, Moscow, Russia, tel. (499) 233-95-02, e-mail: adoil@mail.ru

УДК 624.074

РАСЧЕТ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ВИДЕ РЕЗЕРВУАРОВ С ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

С.Н. Пичугин
(ЗАО «БЭСКИТ», г. Санкт-Петербург)

Напряженно-нелинейное состояние, оболочечные конструкции, нелинейное деформирование

Stress-non-linear state, non-linear deformation

Calculation of shell constructions in the form of reservoirs with a physically nonlinear deformation. Pichugin S.N.

In this work we elaborated resolving equations describing the modes of deformation of

* Автор благодарит профессора М.В. Лурье за руководство работой.