УДК 621.6-5

Г.Н.ЛЕДОВСКИЙ, *студент, G.N Ledovskiy@gmail.com*
С.В.САМОЛЕНКОВ, *аспирант, Samolyonkov@mail.ru*
О.В.КАБАНОВ, *канд. техн. наук, доцент, Kab2003@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

G.N.LEDOVSKIY, *student, G.N.Ledovskiy@gmail.com*
S.V.SAMOLENKOV, *post-graduate student, Samolyonkov@mail.ru*
O.V.KABANOV, *PhD in eng. sc., associate professor, Kab2003@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ СТАНЦИЙ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ВОЛНАХ ДАВЛЕНИЯ

В работе исследуются волновые процессы, возникающие при транспортировке нефти по трубопроводам, приведена математическая модель и представлены результаты компьютерного моделирования волны ударного давления, подтвержденные экспериментом. На основе анализа недостатков существующих систем предложена альтернативная технология защиты нефтеперекачивающих станций от волн давления, повышающая эффективность работы системы трубопроводного транспорта нефти.

Ключевые слова: нефтеперекачивающая станция, гидроудар, волна давления, нестационарный режим, метод характеристик, газовыделение, компьютерное моделирование.

INCREASE OF EFFICIENCY OF SYSTEMS OF PROTECTION OF THE EQUIPMENT OF OIL PUMPING STATIONS AGAINST THE RAISED WAVES OF PRESSURE

We study the wave processes that occurred during the transport of oil by pipeline, the mathematical model and the results of computer simulations of shock wave pressure are given, that are confirmed by experiment. An alternative technology is based on analysis of the shortcomings of existing systems by offering to protect pumping stations of the pressure waves, which increases the efficiency of the system of oil pipelines.

Key words: pumping oil station, water hammer, a pressure wave, transient mode, method of characteristics, gas evolution, computer simulation.

Изменение режима транспортировки нефти по системе магистральных нефтепроводов (МН) вызывает нестационарные процессы, которые могут проявляться в виде скачков и пульсаций давления и расхода. Актуальность исследования подобных процессов связана с увеличением протяженности трубопроводных сетей, постоянным ужесточением требований к технической и экологической безопасности эксплуатации трубопроводных систем, а также усложнением уровня их автоматизации и управления.

В большинстве источников математическая модель, описывающая волновые процессы в трубопроводе, с некоторыми отличиями приведена к системе, состоящей из двух уравнений математической физики:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial p}{\partial t} + u\dfrac{\partial p}{\partial x} + \rho a^2 \dfrac{\partial u}{\partial x} = 0, \\ \dfrac{1}{\rho}\dfrac{\partial p}{\partial x} + u\dfrac{\partial u}{\partial x} + \dfrac{\partial u}{\partial t} + \dfrac{\lambda_{\text{н}}}{2d}u|u| + g\sin\alpha(x) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $a = \left[\rho\left(\beta_{\text{ж}}^{-1} + \beta_{\text{т}}^{-1}\right)\right]^{-1/2}$ – скорость волны ударного давления, м/с [1]; ρ – плотность

жидкости, кг/м^3; $\beta_ж$ – объемный модуль упругости жидкости, Па; $\beta_т = \delta E/d$ – объемная жесткость оболочки трубопровода, Па; E – модуль Юнга материала трубы, Па; δ – толщина стенки трубопровода, м; d – внутренний диаметр трубопровода, м; $\lambda_н$ – коэффициент гидравлического трения при неустановившемся режиме; p – давление, Па; u – скорость потока, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с^2; α – угол между осью трубопровода и поверхностью, град.; x – расстояние, м; t – время, с.

Коэффициент гидравлического трения при нестационарном режиме течения определяется по формуле [6]

$$\lambda_н = \lambda + \frac{\sqrt{V}d}{2u^2}\left[\frac{\partial u}{\partial t} + a\,\mathrm{sign}(u)\left|\frac{\partial u}{\partial x}\right|\right], \qquad (2)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения при стационарном режиме; V – коэффициент затухания Варди, который зависит от режима течения потока: для ламинарного $V = 0{,}00476$, для турбулентного $V = 7{,}41\mathrm{Re}^{-\log(14{,}3/\mathrm{Re}^{0{,}05})}$.

Достаточно точное решение системы уравнений (1) выполняется методом характеристик, который хорошо изучен и применяется в российской и мировой практике сравнительно долгое время. Подробное описание сущности метода и примеры расчетов можно найти в работах И.А.Чарного, Д.А.Фокса, М.В.Лурье и некоторых других авторов. Скачок повышенного давления определяется по формуле Н.Е.Жуковского [1]

$$\Delta p = \rho a \Delta u, \qquad (3)$$

где Δu – изменения скорости потока, м/с.

В начальном сечении находится нефтеперекачивающая станция (НПС), поэтому граничное условие, моделирующее ее работу при постоянной частоте вращения рабочих колес, принимается в виде напорной характеристики насосной станции, которая складывается из напорных характеристик отдельных насосов [3]:

$$p = \rho g\left(h - ku^2\right), \qquad (4)$$

где $k = bS^2$, с^2/м; h – 1-й коэффициент аппроксимации характеристики центробежного насоса, м; b – 2-й коэффициент аппроксимации, с^2/м^5; S – площадь проходного поперечного сечения трубопровода, м^2.

Граничное условие, моделирующее работу НПС в переходном режиме, определяются по формуле [6]

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\partial p}{\partial u}\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial \omega}\frac{d\omega}{dt}, \qquad (5)$$

где ω – частота вращения ротора рабочего колеса, 1/с.

Граничное условие в конечном сечении определяет задвижка, которая одновременно является источником возмущения. Работа таких устройств (задвижка, клапан) описывается через потерю давления, при прохождении потока жидкости через поперечное сечение устройства:

$$\Delta p = K\rho u^2, \qquad (6)$$

где $K = \frac{1}{2}C_{\mathrm{Re}}K_v$ – общий коэффициент потерь; C_{Re} – поправочный коэффициент (определяется по кривой коэффициента расхода); K_v – коэффициент потерь клапана (зависит от типа клапана и позиции запорного органа).

Система уравнений волны ударного давления (1) отличается от аналогичных уравнений волны других авторов [2,5] наличием конвективных слагаемых $u\frac{\partial p}{\partial x}$ и $u\frac{\partial u}{\partial x}$, которые отбрасываются в силу предположения о большой скорости волны и, следовательно, малого количественного вклада в процессе расчета.

В результате газовыделения скорость волны может варьироваться. При этом ее можно найти по формуле [4]

$$a' = \frac{ap}{\sqrt{\rho^2 a^2 RTM + p^2}}, \qquad (7)$$

где R – газовая постоянная, Дж/(кг·К); T – температура, К; M – массовая доля газа.

Для решения задач, связанных с гидравлическим ударом, целесообразно воспользоваться численными методами, например пакетом программного обеспечения «Flowmaster», который позволяет получить решение системы уравнений (1) методом характеристик. С целью проверки достоверности полученных результатов проведено сравнение с экспериментальными данными, полученными в лаборатории Горного университета (кафедра транспорта и хранения нефти и газа)

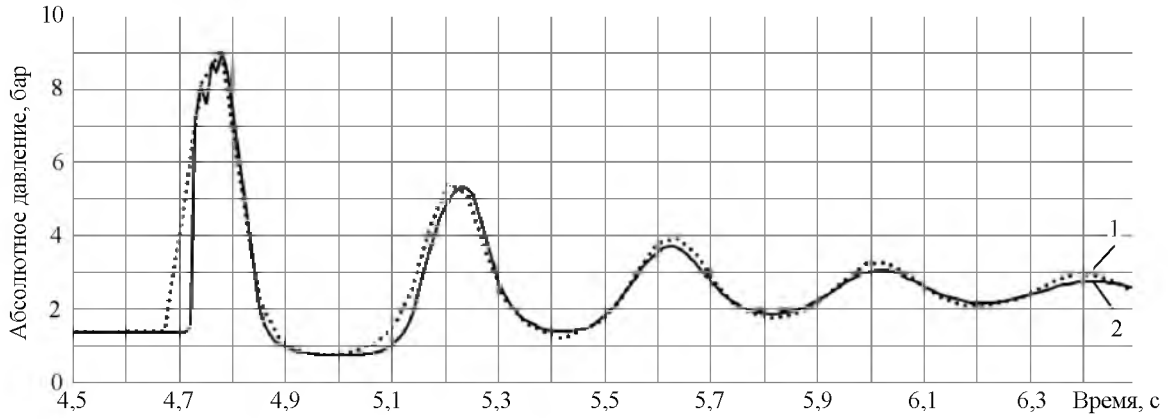


Рис.1. Расчетные и экспериментальные графики изменения давления

1 – Festo; 2 – Flomaster

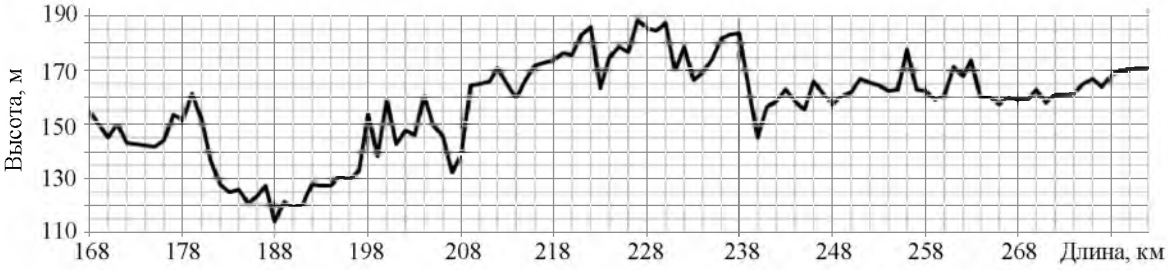


Рис.2. Профиль участка МН «Палкино – Приморск»

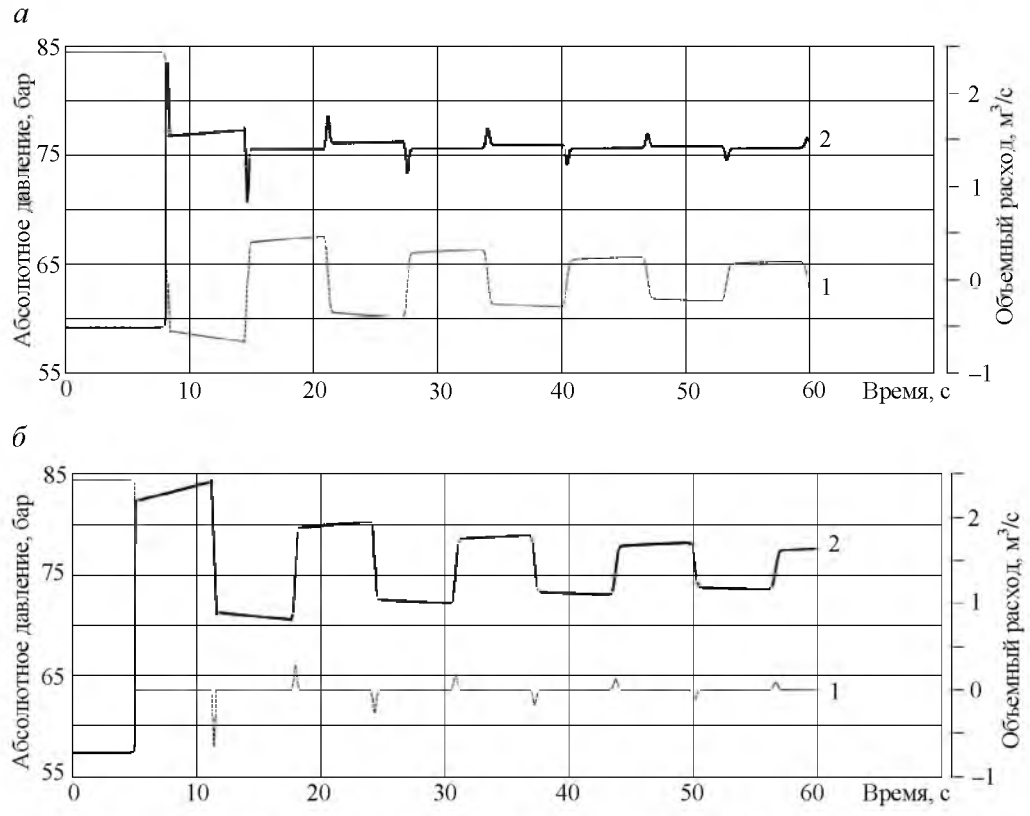


Рис.3. Графики изменения расхода в сечении (1) и давления (2) после НПС (*а*) и перед задвижкой (*б*)

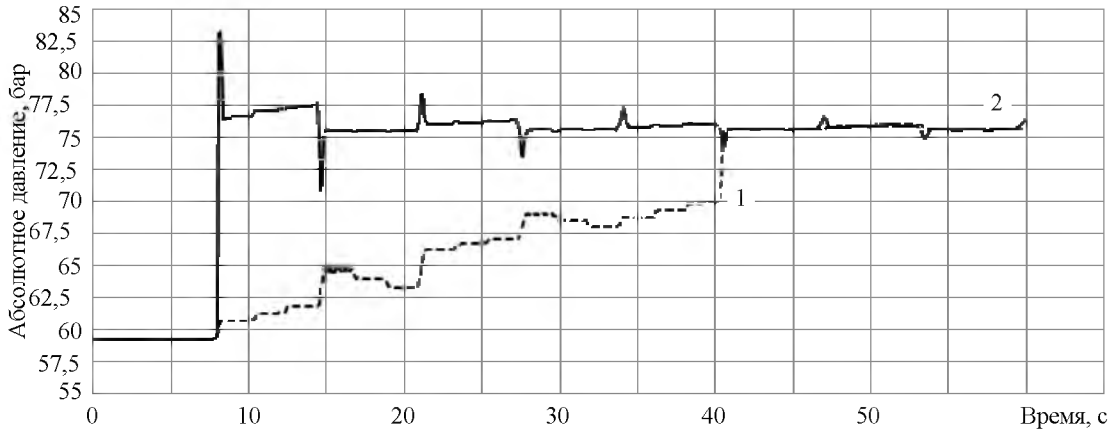


Рис.4. Расчетные графики при наличии (1) и отсутствии (2) системы защиты от волн давления

на гидравлическом стенде по изучению явления гидравлического удара «Festo». Отклонение расчетных и экспериментальных значений не превышает допустимой погрешности 5 % (рис.1).

В качестве примера мест возникновения ударных волн рассмотрим участок МН «Палкино – Приморск» между НПС «Быково» (167,8 км; 155,0 м; $P_{вх} = 5{,}0 \cdot 10^5$ Па; $P_{вых} = 60{,}5 \cdot 10^5$ Па) и НПС «Песь» (282,2 км; 170,8 м; $P_{вх} = 6{,}6 \cdot 10^5$ Па; $P_{вых} = 62 \cdot 10^5$ Па). Магистральный нефтепровод имеет лупинг, который увеличивает расход перекачки до 8780 м^3/ч (2,44 м^3/с). Профиль участка МН и основные данные технологического режима перекачки представлены на рис.2.

При аварии на линейной части задвижка на расстоянии 3 км от НПС «Быково» перекроет все сечение трубопровода. В результате возникнет волна давления, которая, достигнув НПС и отразившись от нее, будет распространяться в обратном направлении. Процесс будет повторяться, пока энергия волны полностью не израсходуется на трение в трубопроводе (рис.3).

Для защиты НПС от повышенных волн давления предлагается разместить систему защиты на ее выходе. Она состоит из сбросного клапана, соединенного трубопроводом меньшего диаметра с линией питания НПС. Для того чтобы защита не пропустила первый, наиболее разрушительный скачок давления, необходимо своевременное срабатывание сбросного клапана. Добиться этого можно, разместив в 2 км от клапана специальную систему автоматики, включающую дифференцирующий блок, а также блок задержки и управления запорной арматурой. Принцип действия устройства защиты основан на создании упреждающего возмущения и возможности регулирования количества сбрасываемой нефти в зависимости от разности расходов в двух точках трубопровода. Эффект от предложенной системы защиты представлен на рис.4. График показывает, что средняя скорость роста давления, поддерживаемая системой защиты после «мгновенного скачка», не превышает допустимой и указанной в технологическом регламенте НПС величины (0,3 бар/с).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Жуковский Н.Е.* О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. М., 1949.

2. *Лурье М.В.* Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. М., 2003.

3. Трубопроводный транспорт нефти: Учеб. для вузов: в 2 т. / Г.Г.Васильев, Г.Е.Коробков, А.А.Коршак и др.; Под ред. С.М.Вайнштока. М., 2002. Т.1.

4. *Фокс Д.А.* Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах. М., 1981.

5. *Чарный И.А.* Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М., 1951.

6. Fluid Transient in Systems / E.B.Wylie, V.L.Streeter-Prentice-Hall: Englewood, 1993.

REFERENCES

1. *Zhukovsky N.E.* On the water hammer in water pipes. Moscow, 1949.

2. *Lurie M.V.* Mathematical modeling of pipeline transportation of oil and gas. Moscow, 2003.

3. Crude oil pipeline: Textbook for universities: in 2 volumes / G.G.Vasilyev, G.E.Korobkov, A.A.Korshak, et al.; Edited by S.M.Weinstock. Moscow, V.1.

4. *Fox D.A.* Hydraulic analysis of unsteady flow in pipelines. Moscow, 1981.

5. *Charny I.A.* Unsteady motion of a real fluid in pipes. Moscow, 1951.

6. Fluid Transient in Systems / E.B.Wylie, V.L.Streeter-Prentice-Hall: Englewood, 1993.