

Влияние пробкового режима течения на механическое поведение трубопровода в зоне П-образного компенсатора

Analysis of the mechanical response of the U-shaped pipeline expansion loop at the plug flow

J.V. Bayusheva¹, A.A. Kovrov¹, M.A. Fedotenko¹

¹Giprovostokneft JSC, RF, Samara

E-mail: Maksim.Fedotenko@Giprovostokneft.ru

Keywords: plug flow, strength analysis of pipelines, transient dynamic analysis, finite element method, hydrodynamic impact

Designing pipeline systems that experience dynamic effects during cork transfer of a product is a complex engineering task. Impacts adversely affect the fatigue strength of the pipeline and also can lead to the considerable shifts of the pipeline and its falling from supporting frameworks. Assessment of behavior of pipelines and safety of their operation at plug flows requires modeling and the analysis of influence of a plug flow on a mechanical response of the pipeline system.

The work describes the construction of a finite element model of the pipeline expansion loop. The solution of this task in non-linearly statement taking into account contact interaction of pipeline support with building constructions is received. The article presents possible solutions for securing the pipeline in order to exclude the possibility of its withdrawal descent from the supports.

It is shown the necessity of further study of a problem of influence of a plug flow for mechanical behavior of pipelines, study and detailed modeling of hydrodynamic effects. Experimental and operational confirmation of the simulation results will be required, as well as an assessment of the effectiveness of the developed compensator designs in terms of vibrations and displacements of supports arising in actual practice operation of the pipeline system will be required.

Быстрый рост газового фактора добывающих скважин некоторых месторождений приводит к образованию неравномерного пробкового режима потока транспортируемого продукта. Движение пробок в трубопроводе может нарушить целостность трубопроводной системы, вызвать перемещения трубопровода относительно строительных конструкций, на которых он установлен. На нефтегазоконденсатном месторождении при эксплуатации нефтесборного трубопровода не исключены аварийные ситуации, связанные со сходом трубопровода с опорных поверхностей строительных конструкций (рис. 1) под действием многофазного потока. В связи с отмеченным актуальна оценка воздействия пробкового режима на работу трубопровода [1].

Целью данной работы являются анализ поведения трубопроводной системы при механическом воздействии пробкового течения в районах П-образных ком-

Ж.В. Баюшева¹,
А.А. Ковров¹,
М.А. Федотенко¹

¹АО «Гипрвостокнефть»

Адрес для связи: Maksim.Fedotenko@Giprovostokneft.ru

Ключевые слова: пробковое течение, прочность трубопроводов, нестационарный динамический анализ, метод конечных элементов, гидродинамическое воздействие

DOI: 10.24887/0028-2448-2019-2-86-89



Рис. 1. Сход трубопровода с опорных поверхностей

пенсаторов, оценка возможности решения данной проблемы путем установки направляющих опорных конструкций.

При пробковом режиме течения жидкостная фаза объединяется в массивные «снаряды», заполняющие большую часть сечения трубопровода. По природе образования пробки можно разделить на:

1) образующиеся вследствие движения скребка внутри трубы;

2) генерируемые при резком изменении рабочего режима трубопровода;

3) появляющиеся на участках изменения профиля трубопровода;

4) образуемые силами межфазного трения (гидродинамические пробки) [1].

В данной работе рассматривается пробковый режим течения четвертого типа, механизм образования которого описан в работе [1]. Пробковое течение – достаточно сложный процесс. Для определения влияния совместного течения жидкости и газа на трубопроводную систему необходимо оценить гидрогазодинамическое воздействие транспортируемой многофазной смеси на элементы трубопровода и рассмотреть механическое поведение трубопровода под действием ударных нагрузок.

Для первой приближенной оценки перемещений трубопровода при пробковом режиме течения в выполненном расчете приняты следующие допущения:

- вес пузырька газа равен нулю;
- пробка жидкой фазы считается жестким телом;
- кратковременные динамические силы, действующие на отводы, не учитываются.

Многофазный поток при расслоенном режиме течения или поток одной фазы при прохождении через П-образный компенсатор последовательно преодолевает четыре отвода. При прохождении однородного потока действующие на разные отводы компенсатора силы F уравниваются друг друга, при прохождении пробки по системе разность плотностей потока приводит к разбалансировке усилий (рис. 2). На каждый из отводов будет действовать центробежная сила инерции от массы жидкости. Эту распределенную нагрузку удобно привести к двум равнодействующим силам, приложенным к центральной точке отвода [2]. Сила воздействия пробкового течения на отвод компенсатора определяется по формуле [1]

$$F = \sqrt{2}Av^2\rho\sin\alpha, \quad (1)$$

где $A = D^2\pi/4$ – площадь сечения трубы; D – диаметр трубы; v – скорость движения пробки; ρ – плотность пробки; α – угол поворота компенсатора.

Тогда осевые составляющие динамического усилия будут рассчитываться по уравнению

$$F_x = F_z = Av^2\rho\sin\alpha. \quad (2)$$

Периодическое усилие изменяется по кусочно-линейному закону. В начальный момент времени воздействие отсутствует. Затем сила возрастает до максимального значения и остается постоянной в течение времени прохождения пробки через рассматриваемое сечение. На последнем промежутке времени усилие снижается, а в конечный момент становится равным нулю (рис. 3) [2].

Моменты времени, в которые изменяется ударное воздействие, определяются по формулам

$$t_1 = \frac{S}{v}, \quad (3)$$

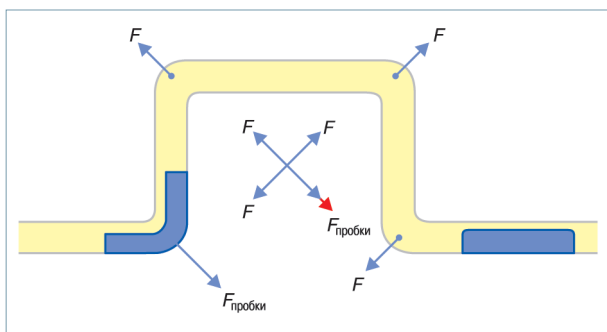


Рис. 2. Схема влияния пробки на П-образный компенсатор

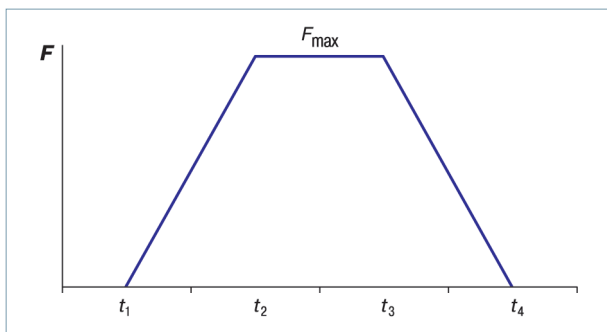


Рис. 3. Изменение периодического усилия F в разные моменты времени t

$$t_2 = t_1 + \frac{D}{v}, \quad (4)$$

$$t_3 = t_2 + \frac{L_{\text{проб}}}{v}, \quad (5)$$

$$t_4 = t_3 + \frac{D}{v}, \quad (6)$$

где S – расстояние от опоры до первого отвода компенсатора; R – радиус отвода трубопровода; $L_{\text{проб}}$ – длина пробки, проходящей через компенсатор.

Оценка воздействия пробкового режима течения на трубопроводную систему выполнена для трубопровода системы нефтесбора DN800, по которому транспортируется нефтегазовая смесь с расходом жидкости более 20 тыс. м³/сут и газа более 3 млн м³/сут. Трубопровод выполнен из труб 820x10 из стали марки 13ХФА. Нефтегазосборные сети рассчитаны из условия максимального начального давления на скважинах – 2,5 МПа и конечного давления на входе центрального пункта сбора (ЦПС) – 0,8 МПа на среднюю температуру перекачиваемой смеси 25 °С. Характеристики пробки, принятые в расчете: скорость – 23,6 м/с; длина – 108 м; масса – 60,2 т; объем – 86 м³.

На исследуемом трубопроводе устанавливаются технологические опоры различных типов:

– неподвижные на концах рассматриваемого участка и предотвращающие перемещения крайних узлов трубопровода по всем направлениям;

– опоры скольжения – хомутовые опоры, которые могут скользить по поверхности строительных конструкций;

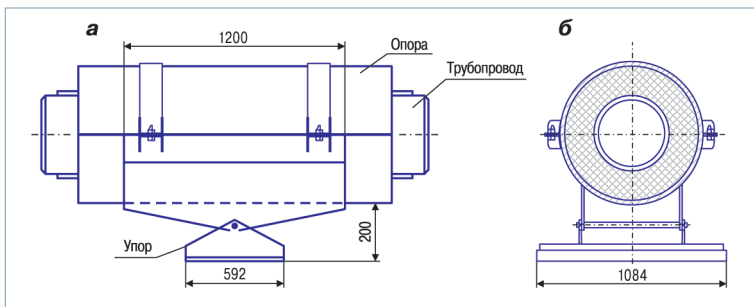


Рис. 4. Вид сбоку (а) и разрез (б) направляющей опоры

– направляющие опоры, представляющие собой опоры скольжения, которые дополнительно закреплены, что препятствует боковому смещению трубопровода относительно строительной конструкции, т.е. в направлении, перпендикулярном оси трубопровода; при моделировании опор данного типа кромки контактных поверхностей (параллельные оси трубопровода) не имеют поступательной степени свободы в направлении, перпендикулярном оси трубопровода.

Схема направляющей опоры скольжения с упорами представлена на рис. 4. Трубопроводные опоры установлены на строительные основания с размерами траверс 900×1500 мм. На основе имеющихся исходных данных с помощью САЕ-пакета ANSYS Mechanical APDL 18.2 была разработана конечно-элементная модель системы. Для моделирования трубопровода используются конечные элементы PIPE288, использующие кинематическую модель, основанную на гипотезе Тимошенко.

Технологические опоры явно не моделируются, их податливость не учитывается. Соединение трубопровода с опорой обеспечивается с помощью наборов связанных узлов. Степени свободы узла трубопровода связываются со степенями свободы центрального узла поверхности опоры. Для качающихся опор степень свободы поворота трубопровода относительно боковой оси не связывается с опорной поверхностью (допускается наклон трубопровода относительно опоры).

Опирающие трубопроводной системы осуществляется через контактное взаимодействие поверхностей трубопроводных опор с поверхностями траверс. При этом используется модель контакта поверхность – поверхность. Для моделирования поверхности скольжения опоры применяются конечные элементы CONTA 174. Строительные конструкции играют роль целевых поверхностей и представляются с помощью элементов TARGE 170. При моделировании контакта учитывается проскальзывание опорных поверхностей относительно строительных конструкций, а также допускается отрыв поверхностей технологических опор от целевых поверхностей [3].

Внешние нагрузки прикладываются к модели в два этапа:

- 1) действие ускорения свободного падения и транспортируемой среды (давления и температуры продукта);
- 2) удар пробки.

Граничные условия определяются на основе размеров технологических опор и траверс строительных конструкций. Поверхности опор не должны выходить за

край траверсы, величина их перемещений не должна превышать 0,7 м в осевом и 1,29 м в боковом направлениях. В противном случае контактное взаимодействие между поверхностями прекращается и трубопровод сходит с опор.

Расчет трубопровода, установленного на опоры скольжения

В первом расчетном варианте предполагается, что в схеме отсутствуют направляющие технологические опоры, ограничивающие боковые смещения. Это приводит к критическим смещениям контактных поверхностей в направлении, перпендикулярном оси трубопровода, в начале второго этапа нагружения, когда пробка ударяет в первый отвод компенсатора. При этом происходит сход технологических опор со строительных конструкций. Графики перемещений технологических опор для данного варианта представлены на рис. 5. Перемещения опор трубопровода в этом случае превышают размеры траверсы и достигают критических значений после удара пробки в первый отвод.

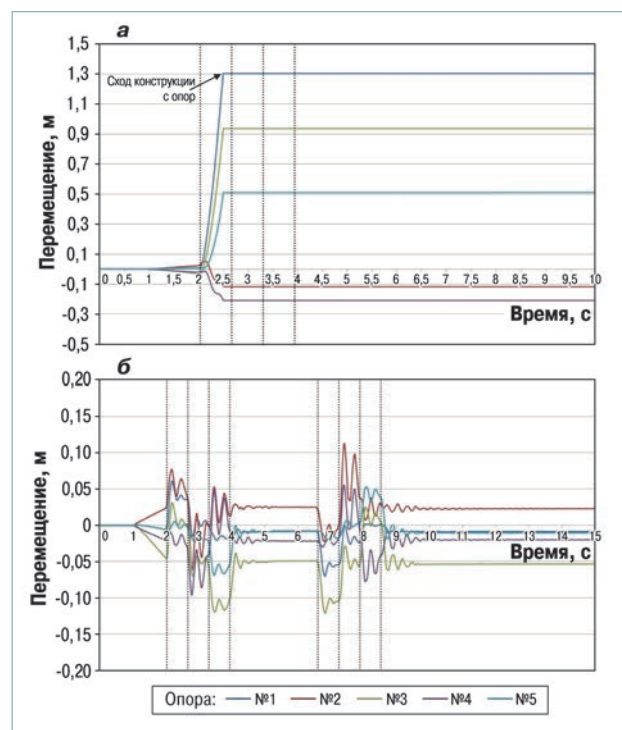


Рис. 5. Боковые перемещения опор в зоне П-образного компенсатора при отсутствии (а) и наличии (б) направляющих опор (пунктирными линиями обозначены моменты удара пробки в отводы компенсатора)

Расчет трубопровода с направляющими опорами

Во втором расчетном варианте рассматривается наличие направляющих опор по границам компенсационного блока. Динамический анализ модели показывает, что включение опор в расчетную схему трубопровода заметно снижает возникающие перемещения опорных поверхностей в зоне П-образного компенсатора (см. рис. 5, б). Схода трубопровода с опор не наблюдается, его дальнейшая эксплуатация после прохождения жидкостной пробки возможна.

Выводы

1. Пробковый режим течения оказывает отрицательное воздействие на трубопроводную систему в зонах П-образных компенсаторов, поворотов трассы и других местах изменения геометрии трубопровода. Ударные воздействия в местах поворотов могут приводить к его сходу со строительных конструкций, повышенным вибрациям и усталостному разрушению конструкции.

2. Применение направляющих опор позволяет ограничить перемещения, возникающие при прохождении жидкостной пробки, и снижает негативное влияние пробкового течения на надежность работы системы, обеспечивает безопасную эксплуатацию трубопровода.

3. Для оценки допущений, принятых в разработанной методике учета влияния пробкового режима течения, и сравнения результатов расчета с фактическими значениями перемещений на схеме требуется проводить регулярные замеры вибраций трубопровода в местах сочленений, отводов и врезок [1].

4. На последующих этапах изучения данной проблемы необходимы уточненное моделирование гидродинамических процессов и анализ их влияния на смещение трубопровода, а также оценка возможности его усталостного разрушения.

Список литературы

1. Анализ влияния многофазного потока на механические колебания нефтегазового трубопровода Новопортовского нефтегазоконденсатного месторождения / Р.А. Хабибуллин, С.С. Девятяров, Е.В. Жигалев. (и др.) // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 12. – С. 56–59.
2. Гаврилин А.В., Перов С.Н., Скворцов Ю.В. Оценка влияния двухфазного потока на параметры нагружения трубопроводной системы // «Энергоэффективность. Проблемы и решения». Материалы Девятой Всероссийской научно-практической конференции 21 октября 2009 г. – Уфа, 2009. – С. 91–93.
3. Моделирование трубопроводных систем с помощью МКЭ – пакета «Ansys» / Ю.В. Скворцов (и др.). – Самара: Гипровостокнефть, 2000. – 84 с.

References

1. Khabibullin R.A., Devyat yarov S.S., Zhigalev E.V. et al., *Flow induced vibration analysis of multiphase pipeline of Novoportovskoye field* (In Russ.), *Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry*, 2017, no. 12, pp. 56–59.
2. Gavrilin A.V., Perov S.N., Skvortsov Yu.V., *Otsenka vliyaniya dvukhfaznogo potoka na parametry nagruzheniya truboprovodnoy sistemy* (Assessment of two-phase flow effect on the loading, strength and safety of a pipeline system), Collected papers "Energoeffektivnost. Problemy i resheniya" (Energy efficiency, Problems and Solutions), Proceedings of IX All-Russian Scientific and Practical Conference, October 21, 2009, Ufa, 2009, pp. 91–93.
3. Skvortsov Yu.V. et al., *Modelirovaniye truboprovodnykh sistem s pomoshchyu MKEH-paketa ANSYS* (Simulation of pipeline systems using the ANSYS), Samara: Publ. of Giprovostokneft, 2000, 84 p.

НОВАЯ КНИГА

Ветераны: из истории развития нефтяной и газовой промышленности. Вып. 31.

М.: ЗАО «ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕФТЯНОЕ ХОЗЯЙСТВО», 2018. – 228 с.



Тридцать первый выпуск сборника «Ветераны» открывается актуальной информацией о деятельности Совета пенсионеров-ветеранов войны и труда ПАО «НК «Роснефть». В рубрике «Из истории Великой Отечественной войны» представлена статья, посвященная 75-летней годовщине прорыва блокады Ленинграда и строительству на Ладожском озере бензопровода в блокадный город. В рубрике «Из истории нефтяной и газовой промышленности» напечатана развернутая статья о жизни и деятельности заведующего кафедрой хранения и транспорта нефти Московского нефтяного института А.Ф. Питулы, написанная на основе новых архивных данных, включающих следственные дела из Центрального архива ФСБ России. Ветеран газопереработки Б.Х. Хусаинов рассказал о строительстве и пуске в эксплуатацию Миннибаевского газоперерабатывающего завода и своей дальнейшей работе в этой области, а Заслуженный эколог РФ Э.Х. Векилов – о зарождении экологической службы в нефтегазовой отрасли СССР. Освоению Западной Сибири посвящены статья известного геолога Н.П. Запывалова и воспоминания участника стройотрядовского движения Л.В. Раскина. Ветераны треста «Арктикморнефтегазразведка» поделились своими воспоминаниями о рождении их предприятия и первых открытиях нефти и газа, сделанных на арктическом шельфе страны.

В честь 80-летия Президента Союза нефтегазопромышленников России Г.И. Шмаля опубликованы воспоминания о нем А.М. Анисимова.

Памяти выдающихся нефтяников посвящены воспоминания о крупном отечественном нефтянике В.Ю. Филановском-Зенкове и мемуарная статья недавно ушедшего из жизни Р.М. Хачатурова.

Традиционно в сборнике опубликованы поздравления юбилярам из Совета пенсионеров-ветеранов войны и труда ПАО «НК «Роснефть».

По вопросам приобретения обращаться по тел: +7 495 231-10-90 (Евдошенко Юрий); или по эл. почте: editor3@oil-industry.ru