ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕРТИФИЦИРОВАННЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ ПРОЧНОСТНОГО АНАЛИЗА РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

POSSIBILITIES OF USING CERTIFIED PROGRAMS FOR STRENGTH ANALYSIS OF PROCESS PIPELINE OPERATION

А. Тажигулов
Adil Tazhigulov

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Д. И. Шагабутдинов
Dim I. Shagabutdinov

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

И. Э. Лукьянова
Irina E. Lukyanova

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

На сегодняшний день в наш век прогресса, развития науки и технологий в мире происходит множество различного рода аварий и катастроф с возникновением серьезных нарушений при принятии неправильных технологических решений на этапе проектирования, строительства и дальнейшей эксплуатации объектов. Это приводит к техногенным катастрофам, которые, в свою очередь, могут стать причиной возникновения взрывов, пожаров, загрязнений окружающей среды, а также причиной гибели людей. Тема обеспечения надежности и безопасности при эксплуатации трубопроводных систем различного назначения становится всё более актуальной на сегодняшний день. В данной статье описываются расчеты технологических трубопроводов на прочность, устойчивость и жесткость, рассматриваются достоинства и недостатки каждого метода расчёта технологических трубопроводов. Также рассматриваются сертифицированные программы для возможности проведения автоматизированного расчета на прочность технологических трубопроводов, а именно Старт-Проф и Caesar II, которые были созданы на основе метода конечных элементов, с их помощью получают достаточно высокоточную модель, необходимую при проведении прочностного расчета. Использование указанных пакетов программ в дальнейшем позволит визуально оценить, проанализировать поведение трубопроводной системы и принять правильные технические решения во избежание превышения допускаемых нагрузок на штуцерах оборудования, предельных нагрузок в самом трубопроводе, превышения перемещений на отводах, с учетом использования пружинных опор, подвесок и с применением различных видов компенсаторов. Кроме того, уже на этапе проектирования становится возможным определить более эргономичную трассировку технологического трубопровода, что, в свою очередь, укажет на конечную металло- и капиталоемкость объекта, и, как следствие, послужит гарантией безопасной эксплуатации трубопроводных систем различного назначения.

Today, in the age of progress, development of science and technology, different kind of accidents and disasters occur in the world due to occurrence of serious violations when making incorrect technological decisions at the stage of design, construction and further operation of facilities. This leads to man-made disasters, which, in turn, can cause explosions, fires, environmental pollution, as well as the cause of death.

Ключевые слова

расчет; технологический
трубопровод; прочность;
Старт-Проф; Caesar II;
строительная механика;
программное моделирование

Keywords

calculation; process pipeline;
strength; Start-Prof; Caesar II;
construction mechanics;
software modeling

The issue of ensuring reliability and safety during the operation of pipeline systems for various purposes is becoming more and more relevant today. This article describes the calculations of process pipelines for strength, stability and rigidity, discusses the advantages and disadvantages of each method for calculating process pipelines. Certified programs are also being considered for the possibility of carrying out automated strength analysis of process pipelines, namely Start-Prof and Caesar II, which were created on the basis of the finite element method. By means of these programs a sufficiently high-precision model is obtained, which is necessary for carrying out the strength calculation. The use of these software packages in the future will make it possible to visually evaluate, analyze the behavior of the pipeline system and make the right technical solutions in order to avoid exceeding the permissible loads on equipment nozzles, maximum loads in the pipeline itself, exceeding displacements at the branches, taking into account the use of spring supports, hangers and using various types of compensators. In addition, at the design stage, it becomes possible to determine a more ergonomic routing of the process pipeline, which, in turn, will indicate the final metal and capital intensity of the facility, and, as a result, will serve as a guarantee of safe operation of pipeline systems for various purposes.

Для расчета технологических трубопроводов существует такая наука, как строительная механика. Необходим расчет на воздействие температуры, установленных нагрузок, внутренних напряжений и нагрузок на опоры для статически неопределимых систем, какими представляются трубные компенсаторы и трубопроводы.

Чтобы произвести расчет компенсатора, необходимо выполнить расчет простой рамы, впоследствии составляется система уравнений метода сил; для составления уравнений, а конкретнее расчета каждого коэффициента системы уравнений, составляются эпюры.

Такой метод позволяет определить напряженно-деформированное состояние произвольной системы трубопровода [1].

С 1965 г. нормативная база для проектирования и расчетов трубопроводов претерпела ряд значительных изменений:

1. Допускаемые компенсационные напряжения стали в 2 раза больше;
2. Повышенная гибкость крутоизогнутых отводов должна учитываться при расчетах;
3. Необходимо оценивать не только статическую прочность труб, но и прочность отводов, тройников, переходов при циклических нагрузках [2].

Все это дает увеличение компенсируемых длин в трубопроводе в 4–8 раз. В результате этого современные методы расчетов позволяют использовать более простую конфигурацию трубопроводов, с наименьшим числом трубных компенсаторов, а также с менее частым применением мертвых опор.

Позже появились системы расчета на вычислительных машинах, например [3]. Данная работа описывает построение дискретной динамической модели, основанной на методе сил. Но такой принцип является ограниченным, так как большинство расчетных динамических моделей основано на работе конечно-элементного метода перемещений [4].

В работе [5] обоснована необходимость разработки эффективных моделей, методов и программ расчета трубопроводов при заданном режиме действия нагрузок, которые позволят улучшить качество проектно-конструкторских работ, ускорить разработку и освоение новой техники.

Современные методы расчетов предполагают программное моделирование расчетных динамических моделей. Программный комплекс Старт-Проф был разработан еще в 1965 году, впервые введен в промышленную эксплуатацию в 1969 году и с тех пор претерпел ряд улучшений и обновлений.

Программа Старт-Проф является одной из известных сертифицированных программ для расчета прочности трубопроводов различного назначения в России и странах СНГ. Данная программа имеет уровень особого промышленного стандарта и по своим потребительским свойствам никак не уступает зарубежным аналогам.

Осуществление расчетов по сертифицированной программе Старт-Проф гарантирует надежность и безопасность при эксплуатации трубопроводных систем, упрощает регулирование проекта с контролирующими

органами (Ростехнадзор, Главгосэкспертиза), уменьшает расходы и время пусконаладочных работ.

Расчет трубопроводов на прочность в программе Старт-Проф содержит оценку статической и циклической прочности. Весьма часто программу приобретают, чтобы осуществить расчет прочности трубопроводов тепловых сетей.

В качестве нагрузок можно рассматривать массу конструкции, внешние нагрузки, а также смещения опор, тепловое расширение, внутреннее и наружное давление, гидравлический удар, сейсмические, ветровые, снеговые и гололедные нагрузки [6, 7].

Рассчитываемая модель (рисунок 1) включает в себя такие элементы, как:

— прямые участки трубопровода;

Рисунок 1. Состав модели

— отводы;
— арматура;
— опоры («мертвая», направляющая, односторонняя, скользящая, пружинная);
— компенсаторы (угловые, осевые, стартовые).

Расчеты трубопроводов на прочность начинают с установления толщины стенки. Внутреннее избыточное давление является наиболее опасным явлением, воздействующим на конечный выбор толщины стенки.

Давление принадлежит к ключевым воздействиям на трубопровод, а все другие (вес, температурный нагрев и т.п.) — к категории дополнительных. В случае, если труба или деталь (отвод, тройник т.п.) обладают неподходящей толщиной стенки для восприятия давления, расчет трубопровода на дополнительные нагрузки осуществлять бесполезно [8].

Итоги расчета:

— напряжения в трубопроводе, в том числе напряжения в отводах, переходах, прямых и косых тройниках;
— перемещения узлов трубопровода;

— деформации компенсаторов;
— расчет устойчивости участков с вакуумом;
— вычисление устойчивости надземных и подземных участков трубопровода;
— проверка герметичности фланцевых соединений;
— контроль нагрузок на центробежные насосы [9–12].

Впоследствии получение системой для расчета прочности трубопроводов Caesar II сертификата ГОСТ Р о соответствии требованиям отечественных нормативных документов заинтересовало российские компании — пользователей программного комплекса Старт-Проф.

Старт-Проф раньше считался более распространенной на территории РФ сертифицированной программой с целью проведения прочностных расчетов трубопроводов различного назначения. В последнее время российские компании начали переходить на Caesar II.

Данный факт периодически вызывает дискуссии в инженерном сообществе относительно целесообразности применения дан-

ного программного обеспечения в России ввиду его зарубежного происхождения.

Однако программа Caesar II допускает проведение расчета на дополнительные нагрузки без проверки на прочность по внутреннему давлению. Получаемые при этом результаты расчета, несмотря на кажущуюся корректность, могут оказаться недостоверными.

В Caesar II, при необходимости, свойства материала можно задать в любом виде, исходя из предпочтений расчетчика. Это можно сделать либо непосредственно в диалоговом окне исходных данных материала, либо пополнив базу данных по материалам своими исходными данными [13].

Таким образом, то, какую величину предела текучести использовать в расчете, решать только инженеру-расчетчику.

Программа позволяет задавать любые необходимые в расчете характеристики материала — не только предел текучести, но и допускаемое напряжение и другие параметры. База данных материалов открыта, и на данный момент в ней присутствует уже порядка 40 российских материалов, каждый из которых привязан к своему нормативному документу.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Храменков С.В., Примин О.Г., Орлов В.А. Реконструкция трубопроводных систем. М.: АСВ, 2007. 215 с.
2. ASME B31.3-2016. ASME Code for Pressure Piping, B31. Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping / The American Society of Mechanical Engineers. New York, 2017.
3. Магалиф В.Я., Якобсон Л.С. Расчеты трубопроводов на вычислительных машинах. М.: Энергия, 1969. 295 с.
4. Huang S.L. et al. Oil and Gas Pipeline Deformation Finite Element Analysis of Eddy Current Probe Coil // Journal of Tsinghua University. 2011. No. 51. P. 390–394.
5. Куликов Ю.А. Динамика трубопроводов летательных аппаратов: дис. ... д-ра техн. наук. Йошкар-Ола, 1995. 282 с.
6. Гуревич Д.Ф., Шпаков О.Н. Справочник конструктора трубопроводной арматуры. Л.: Машиностроение, 1987. 517 с.
7. Храменков С.В. Стратегия модернизации водопроводной сети. М.: Стройиздат, 2005. 398 с.
8. Delbeck W., Engel A., Knocinski Z., Müller D. Auswirkung des Stresstests auf Spannungsrißkorrosionsgeschädigte Leitungsbauteile // GAS-Erdgas. 1993. Vol. 134. No. 5. P. 263–271.
9. СА 03-003-07. Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов. М.: Ростехэкспертиза, 2007. 70 с.

Обеспечение соответствия трубопроводных систем международным и национальным стандартам играет существенную роль при их проектировании и дальнейшей эксплуатации.

Решение Caesar II позволяет быстро подгружать и отображать данные, необходимые для корректной визуализации расчетной модели, оценивать напряженно-деформированное состояние [14].

Критерии прочности трубопроводов в российских нормах, как правило, оказываются более жесткими, чем в американских аналогах. Трубопроводы, прочность которых подтверждена программой Caesar II, в ряде случаев могут не удовлетворять условиям прочности российских норм.

Вывод

Рассмотрены возможности использования сертифицированных программ для прочностного анализа работы технологических трубопроводов. Описаны способности программы Старт-проф в построении расчетной модели. Показана существенная разница между российской программой Старт-проф и зарубежной Caesar II.

10. СП 36.133.30.2012. Магистральные трубопроводы. М.: Госстрой, 2012. 130 с.
11. Мартынов В.Б., Серебряный В.Б. Эксплуатация и ремонт технологических трубопроводов под давлением до 10.0 МПа (100 кгс/см²). М.: Химия, 1988. 288 с.
12. Тавастшерна Р.И., Бесман А.И., Позднышев В.С. Технологические трубопроводы промышленных предприятий. М.: Стройиздат, 1991. 655 с.
13. Huang K., Wu S., Chen L. et al. Stress Analysis of Oil and Gas Pipeline Parallel Laying when Traversing Tunnels // Journal of Chemical & Pharmaceutical Research. 2014. No. 6(6).
14. Xiaonan W., Yan X., Yuanhai L., et al. Analysis on Gas Pipeline Stress in Tunnel during Pigging // Natural Gas and Oil. 2012. No. 2. P. 002.

REFERENCES

1. Khramenkov C.B., Primin O.G., Orlov V.A. *Rekonstruktsiya truboprovodnykh sistem* [Reconstruction of Pipeline Systems]. Moscow, ASV Publ., 2007. 215 p. [in Russian].
2. ASME B31.3-2016. ASME Code for Pressure Piping, B31. Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping. The American Society of Mechanical Engineers. New York, 2017.
3. Magalif V.Ya., Yakobson L.S. *Raschety truboprovodov na vychislitel'nykh mashinakh* [Calculations of Pipelines on Computers]. Moscow, Energiya Publ., 1969. 295 p. [in Russian].

4. Huang S.L. e.a. Oil and Gas Pipeline Deformation Finite Element Analysis of Eddy Current Probe Coil. *Journal of Tsinghua University*, 2011, No. 51, pp. 390–394.
5. Kulikov Yu.A. *Dinamika truboprovodov letatel'nykh apparatov: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Dynamics of Aircraft Pipelines: dis. Dr. Engin. Sci.]. Ioshkar-Ola, 1995. 282 p. [in Russian].
6. Gurevich D.F., Shpakov O.N. *Spravochnik konstruktora truboprovodnoi armatury* [Pipe Fitting Designer Reference]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1987. 517 p. [in Russian].
7. Khramenkov C.B. *Strategiya modernizatsii vodoprovodnoi seti* [Water Supply Network Modernization Strategy]. Moscow, Stroiizdat Publ., 2005. 398 p. [in Russian].
8. Delbeck W., Engel A., Knocinski Z., Müller D. Auswirkung des Stresstests auf Spannungsrißkorrosionsgeschädigte Leitungsbauteile. *GAS-Erdgas*, 1993, Vol. 134, No. 5, pp. 263–271.
9. SA 03-003-07. *Raschety na prochnost' i vibratsiyu stal'nykh tekhnologicheskikh truboprovodov* [SA 03-003-07. Strength and Vibration Calculations for Steel Process Pipelines]. Moscow, Rostekhekspertiza Publ., 2007. 70 p. [in Russian].
10. SP 36.13330.2012. *Magistral'nye truboprovody* [SP 36.13330.2012. Main Pipelines]. Moscow, Gosstroi Publ., 2012. 130 p. [in Russian].
11. Martynov V.B., Serebryanyi V.B. *Ekspluatatsiya i remont tekhnologicheskikh truboprovodov pod davleniem do 10.0 MPa (100 kgs/sm²)* [Operation and Repair of Process Pipelines Under Pressure up to 10.0 MPa (100 kgf / cm²)]. Moscow, Khimiya Publ., 1988. 288 p. [in Russian].
12. Tavastsherna R.I., Besman A.I., Pozdnyshchikov V.S. *Tekhnologicheskie truboprovody promyshlennyykh predpriyatii* [Process Pipelines of Industrial Enterprises]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1991. 655 p. [in Russian].
13. Huang K., Wu S., Chen L. e.a. Stress Analysis of Oil and Gas Pipeline Parallel Laying when Traversing Tunnels. *Journal of Chemical & Pharmaceutical Research*, 2014, No. 6(6).
14. Xiaonan W., Yan X., Yuanhai L., e.a. Analysis on Gas Pipeline Stress in Tunnel during Pigging. *Natural Gas and Oil*, 2012, No. 2, pp. 002.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Тажигулов Адиль, магистрант кафедры «Сооружение и ремонт газонефтепромыслов и газонефтехранилищ», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Adil Tazhigulov, Under-graduate Student of Construction and Repair of Gas and Oil Pipelines and Storage Facilities Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: adiltaz96@yandex.ru

Шагабутдинов Дим Ильгамович, магистрант кафедры «Сооружение и ремонт газонефтепромыслов и газонефтехранилищ», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Dim I. Shagabutdinov, Under-graduate Student of Construction and Repair of Gas and Oil Pipelines and Storage Facilities Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: shagabutdinov.dim@mail.ru

Лукьянова Ирина Эдуардовна, д-р техн. наук, профессор кафедры «Сооружение и ремонт газонефтепромыслов и газонефтехранилищ», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Irina E. Lukyanova, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Construction and Repair of Gas and Oil Pipelines and Storage Facilities Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: iri-lou@mail.ru