

УДК 622.692.4

А.С. Синюгин, аспирант, кафедра «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов», ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет», e-mail: alexsinugin@gmail.com; **Т.Р. Мустафин**, к.т.н., старший преподаватель, кафедра «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ», ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», e-mail: st@rusoil.net

Исследование перераспределений остаточных напряжений в стальном магистральном трубопроводе, появившихся в результате образования в трубе дефекта типа «вмятина», под воздействием внутреннего давления

В работе представлены результаты изучения вопросов распределения и перераспределения остаточных напряжений металла нефтепровода вследствие образования дефекта типа «вмятина». Построена конечно-элементная модель трубы, получены данные о величинах и зонах концентраций остаточных напряжений и деформаций, исследовано изменение расположения этих зон под воздействием внутреннего давления.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, вмятина, напряженно-деформированное состояние, остаточные напряжения, пластические деформации, конечно-элементный анализ.

Изучение вопроса расположения остаточных напряжений в металле не утрачивает своей актуальности на протяжении последних десятилетий. Существующие натурные и аналитические методы определения наличия остаточных напряжений либо требуют разрушения образца, либо не позволяют определить величину остаточных напряжений с необходимой точностью. Исследовательской группой была поставлена задача по изучению перераспределений остаточных напряжений в стальном магистральном трубопроводе, появившихся в результате образования в трубе дефекта типа «вмятина», под воздействием внутреннего давления. Подобная задача не может быть решена при помощи традиционных разрушающих методов исследования остаточных напряжений.

Уровень развития метода конечных элементов (МКЭ) позволяет смоделировать данный процесс на ЭВМ.

В ФГБОУ ВПО УНГТУ автором [1] был собран стенд для моделирования процесса образования вмятины. Одной из исследованных труб был участок трубы 530 x 8 мм длиной 750 мм.

Геометрическая сеточная модель участка трубы была собрана в программном комплексе ANSYS 14.5 из элементов solid186. Ограничение степеней свободы соответствует закреплению в раме

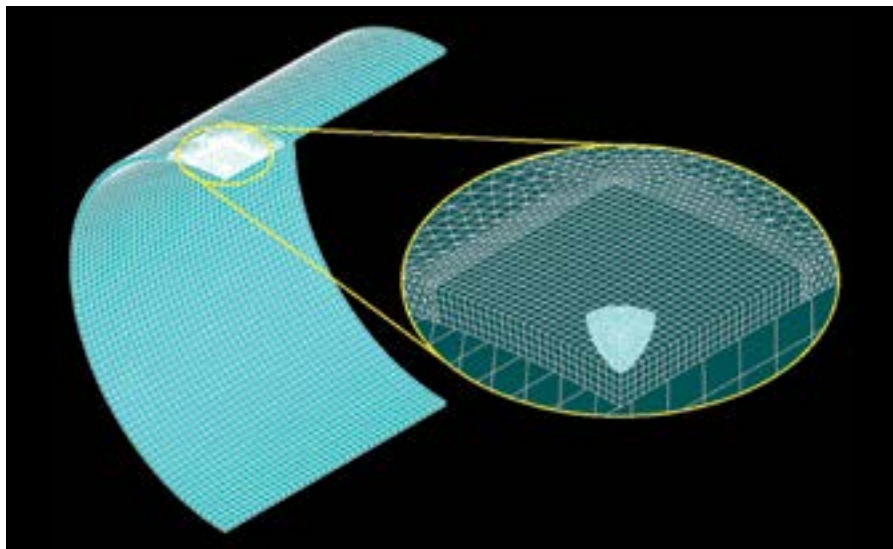


Рис. 1. Общий вид конечно-элементной модели и зоны контакта

согласно проведенному стендовому испытанию [1].

На рисунке 1 показаны модель и зоны контакта «шарик – труба».

Поскольку рассматриваемый объект симметричен, построенная модель состоит из четвертой части участка трубы, а по линиям сечения задана полная симметрия при помощи функции Symmetry A.B.

Для задания упругопластических свойств материала конструкции используется мультлинейная диаграмма деформации, соответствующая данным, полученным при исследовании прочностных характеристик металла трубы (рис. 2), для шарика введен линейный закон с модулем Юнга $2.05 \cdot 10^{11}$.

К шарикау приложено давление, равное нагрузке в 150 кН к площади поперечного сечения шарика, приводящее к образованию вмятины глубиной 31 мм (5,85% от диаметра трубы).

Моделирование проводилось в три этапа. В рамках первого шарик воздействовал на трубу, второй этап характеризовался возвращением шарика в

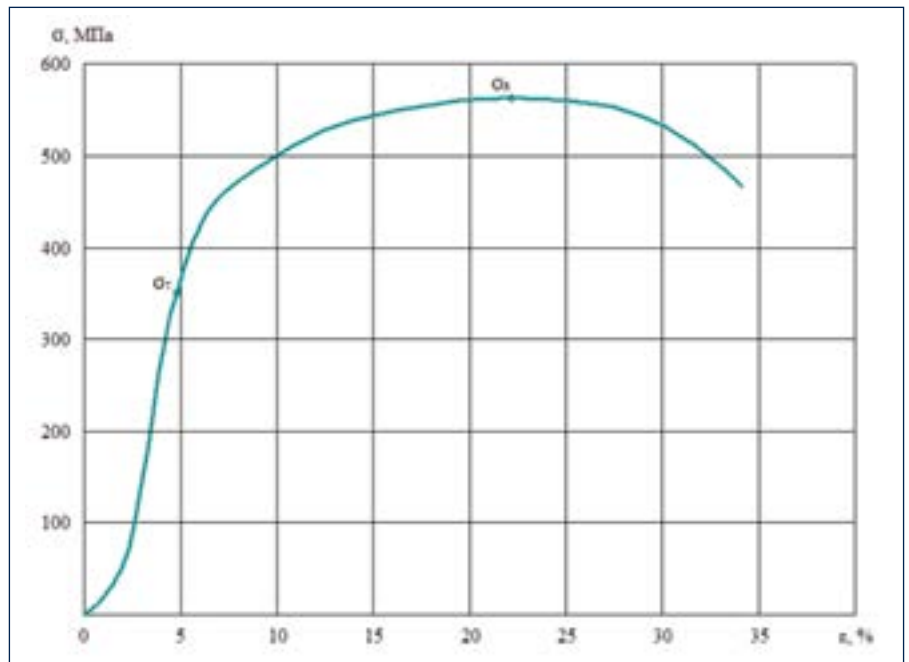


Рис. 2. Диаграмма растяжения металла трубы

исходную позицию и, как следствие, снятием упругих напряжений, третий же этап заключался в прикладывании к внутренней поверхности трубы давления перекачиваемого продукта.

Давление прикладывалось ступенчато с шагом 2 МПа. Прочностной расчет трубопровода согласно действующим нормам [2] показал, что максимальное рабочее давление данной трубы (в слу-

Getac

Защищенные мобильные планшеты для нефтегазового сектора

- Сверх-яркие экраны для работы на солнце
- Полностью защищенные модели со степенью защиты до IP65
- Взрывозащищенные модификации, сертифицированные по стандартам ATEX
- Устойчивость к ударным и вибрационным нагрузкам в соответствии с MIL-STD-810G
- Время автономной работы до 12 часов и функции горячего резерва батарей
- Широкий рабочий температурный диапазон до $-30...+50$ °C
- Работа в сетях 4G, 3G, GPRS, Wi-Fi, GPS, ГЛОНАСС, Bluetooth
- Гарантия 5 лет



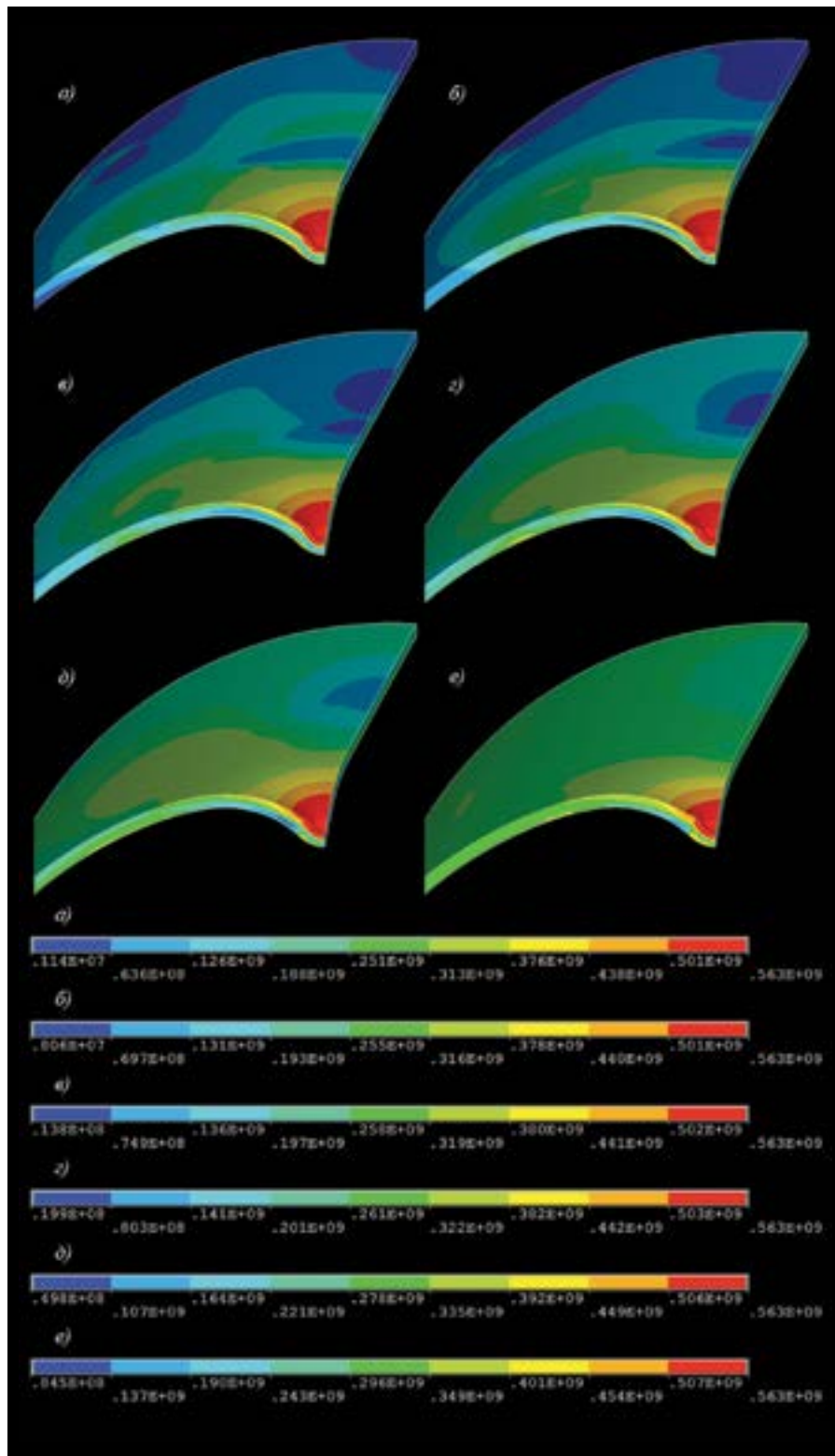


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений (Па) в металле трубы при: а – отводе шарика; б – внутреннем давлении 2 МПа; в – 4 МПа; г – 6 МПа; д – 8 МПа; е – 10,7 МПа

чае присвоения участку III или IV категории) будет равно 10,7 МПа, вследствие чего шаги давления были приняты 2; 4; 6; 8 и 10,7 МПа.

На рисунке 3 представлено распределение остаточных напряжений в трубе после отвода шарика, а также для каждого исследуемого давления.

В то же время различия абсолютных деформаций (рис. 4) металла вследствие нагружения трубы внутренним давлением невелики, поэтому приведены лишь деформации случаев отвода шарика и максимального давления 10,7 МПа.

Ранее автором [1] было доказано, что вмятины на магистральных трубопроводах глубиной менее 6% диаметра не опасны, и данный тезис подтверждается результатами моделирования. Исходя из этого, а также из факта совпадения геометрических размеров вмятины модели и реальной трубы, можно судить о высокой степени сходимости результатов.

Как уже упоминалось выше и показано на рисунке 4, геометрия вмятины и ее глубина с ростом внутреннего давления продукта в трубопроводе изменяются незначительно, и эти изменения не превышают 2 мм при максимально допустимой нагруженности трубопровода. Моделирование процесса образования вмятины на стенке показало (рис. 3а), что распределение напряжений происходит таким образом, что напряжение разрушения (560 МПа) сконцентрировано непосредственно под точкой приложения усилия. В то же время в данной области имеет место напряжение сжатия и явление наклепа, что объясняет отсутствие разрушения металла непосредственно под шариком и подтверждает результаты стендовых испытаний [1]. Зона перехода профиля вмятины в цилиндрическую часть (зона перегиба) трубы совпадает с зоной превышения остаточными напряжениями предела текучести (351 МПа). Именно в этих областях наблюдалось разрушение вырезанных из труб образцов при стендовых испытаниях и зарождение микротрещин при недопустимых геометрических параметрах вмятины [1]. Сравнивая на рисунке 3 результаты воздействия внутреннего давления, видно, что с его ростом зона распространения напряжений, превышающих предел текучести (351 МПа, рис. 2), постепенно увеличивается. Так, подобные напряжения без воздействия внутреннего давления сконцентрированы строго в зоне перегиба воронки вмятины (рис. 3а). При значении внутреннего давления

2 и 4 МПа (рис. 3б и 3в) наблюдается тенденция к вытягиванию этой зоны по окружности трубы. В случае дальнейшего увеличения давления до 6 и 8 МПа (рис. 3г и 3д) размеры пятна пластических напряжений увеличиваются уже вдоль оси трубы, и пятно занимает значительное пространство относительно первоначальной картины (рис. 3а). Последний этап нагружения (10,7 МПа; рис. 3е) характеризуется экстремальным внутренним давлением, равным предельно допустимому. Зона пластических напряжений в данном случае увеличивается в два раза относительно первоначального состояния. Кроме того, необходимо заметить, что вследствие нагружения трубы максимально допустимым внутренним давлением почти вся поверхность исследуемого участка характеризуется напряжениями в 298 МПа и более (85% от предела текучести стали).

Из полученных в результате постановки эксперимента данных можно сделать вывод о том, что в результате воздействия внутреннего давления на участках с дефектами типа «вмятина» происходит перераспределение внутренних напряжений. В частности, с

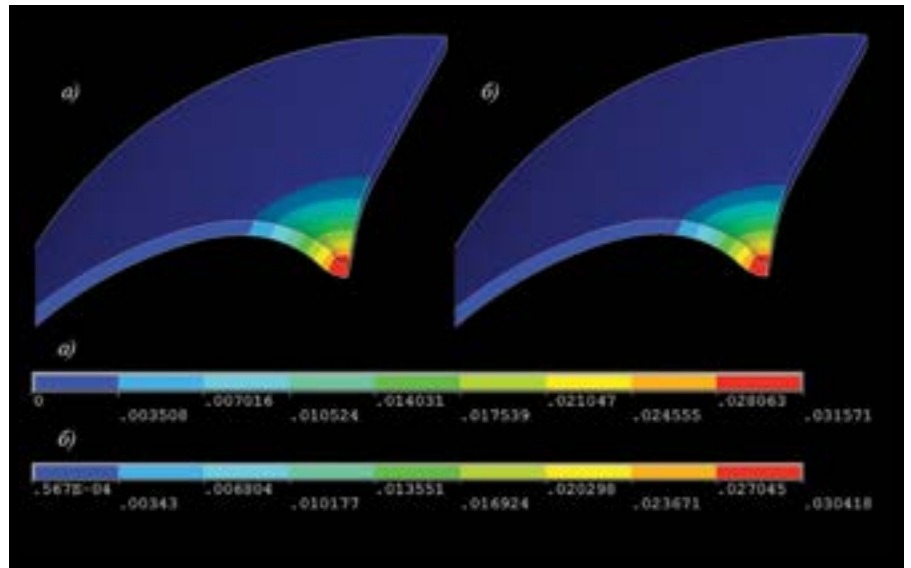


Рис. 4. Абсолютная деформация металла (м) трубы при: а – отводе шарика; б – внутреннем давлении 10,7 МПа

ростом внутреннего давления вплоть до максимально допустимого (10,7 МПа) в области дефекта существенно увеличиваются площади зон пластических напряжений и зон, в которых значение остаточных напряжений превышает 85% от предела текучести. Кроме того, с повышением внутреннего давления в зоне перегиба наблюдается

рост значений остаточных напряжений, что будет способствовать ускоренному развитию микротрещин, факт образования которых для вмятин глубиной более 6% от диаметра трубы был доказан в [1]. Этим участкам необходимо уделять повышенное внимание при диагностике и ремонте магистральных трубопроводов.

Литература:

1. Мустафин Т.Р. Изучение прочностных характеристик стальных трубопроводов с дефектами типа «вмятина»: дисс. ... кандидата технических наук: 25.00.19 / Мустафин Тимур Раилевич; [Место защиты: Уфим. гос. нефтяной техн. ун-т]. – Уфа, 2013.
2. СП 36.13330.2012 «Магистральные трубопроводы»: актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85*. – М.: Госстрой, ФАУ «ФЦС», 2012. – 97 с.

UDC 622.692.4

A.S. Sinyugin, Post Graduate, Chair «Machines and Equipment of Oil and Gas Fields», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Samara State Technical University», e-mail: alexsinugin@gmail.com; **T.R. Mustafin**, Candidate of Sciences (Engineering), Senior Lecturer, Chair «Construction and Repair of Gas and Oil Pipelines, and Gas and Oil Storages», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Ufa State Petroleum Technological University», e-mail: st@rusoil.net

Research of redistributions of residual stresses in steel main pipeline appeared as a result of formation of dimple type defect in the pipe under the influence of internal pressure

The paper contains represented results of the study of issues concerning distribution and re-distribution of residual stresses of metal of oil pipeline as a result of formation of dimple type defect. Finite element representation of the pipe is constructed, the data are obtained on the values and zones of concentrations of residual stresses and deformations, and modification of location of these zones under influence of internal pressure is studied.

Keywords: main pipelines, dimple, strain-stress state, residual stresses, cold flows, finite element analysis.

References:

1. Mustafin T.R. Izuchenie prochnostnykh kharakteristik stal'nykh truboprovodov s defektami tipa «vmyatina» (Study of strength properties of steel pipelines with dimple type defects): diss. ... of Candidate of Sciences (Engineering): 25.00.19 / Mustafin Timur Railevich; [Place of defence: Ufa State Petroleum Technological University]. – Ufa, 2013.
2. SP 36.13330.2012 «Magistral'nye truboprovody» («Main pipelines»): updated version of SNiP 2.05.06-85*. – Moscow: Gosstroy, Federal Autonomous Establishment «Federal Standardization Centre», 2012. – 97 p.