

И. Н. Будилов, Г. В. Кулясов, Ю. В. Лукащук, В. В. Шевела

## ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ НАЛИЧИИ ДЕФЕКТОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Приводятся результаты исследования напряженно-деформированного состояния и оценка прочности в зонах вмятин на трубах технологических трубопроводов. Методами компьютерного моделирования определены коэффициенты концентрации напряжений и деформаций как при упругом, так и при упругопластическом характере локального деформирования материалов в зоне механического дефекта. Оценены величины предельной деформации и условие прочности, обеспечивающие надежность технологических трубопроводов при наличии дефектов механического происхождения. *Компьютерное моделирование; технологические трубопроводы; остаточный ресурс; коэффициент концентрации напряжений; коэффициент концентрации деформаций*

Большое количество сосудов, аппаратов и технологических трубопроводов нефтеперерабатывающих предприятий в настоящее время выработали свой нормативный срок службы. До десяти процентов от общего числа дефектов и повреждений, выявленных при техническом диагностировании, составляют дефекты механического происхождения, связанные с внешним воздействием (вмятины, гофры, выпучины).

При превышении геометрических размеров дефектов значений, установленных нормативно-технической документацией, возможность дальнейшей эксплуатации объекта определяется по результатам дополнительного расчета на прочность. Известно, что существующие нормативные методики такого расчета не позволяют в полной мере учесть все факторы, влияющие на прочность и остаточный ресурс.

Аналізу величини коефіцієнтів концентрації напружень і деформацій во вмятинах посвящено більше кількість досліджень. Необхідно відзначити, що більшість розрахункових моделей будуються по наступному принципу. Величини і характер розподілення внутрішніх силових факторів в зоні дефекта оцінюється на розрахунковій моделі, побудованій на основі механіки стержней. Полагається, що центральне окружне сечення елемента, маючого вмятину, складається з прямолинійної ламаної і криволинійної частей єдиничної ширини. Напружене стання в зоні вмятини під дією внутрішніх зусиль аналізується в передположенні, що вмятина образовалась при пластическом деформировании в условиях чистого изгиба.

Понятно, что такой подход не позволяет оценить трехмерный характер распределения параметров напряженно-деформированного состояния в зоне дефекта. Кроме того, исключается возможность адекватного учета преднапряженного состояния, обусловленного процессом формирования вмятины путем пластического деформирования.

В настоящей работе предлагаются подходы к использованию трехмерных расчетных моделей, основанных на численном методе конечных элементов, и приводятся некоторые результаты исследования напряженного состояния в зоне вмятины, имеющей правильную геометрическую форму, на технологическом трубопроводе. В качестве основных инструментов исследования использованы вычислительные комплексы DEFORM-3D и ANSYS [1, 2].

Расчетные модели, реализованные в пакете DEFORM-3D [1], позволяют рассмотреть процесс формирования вмятины и оценить распределение пластических деформаций, а также уровень повреждаемости материала. Расчетные модели, реализованные в пакете ANSYS [2], позволяют оценить концентрацию напряжений в зоне дефекта при действии на элемент конструкции внутреннего давления с учетом преднапряженного состояния материала.

### 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ЗОНЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕФЕКТА ТИПА ВМЯТИНЫ

Оценим параметры напряженно-деформированного состояния и параметры повреждаемости материала в зоне формирования дефекта типа вмятины.

Программный комплекс DEFORM-3D имеет встроенные средства прогнозирования повреждаемости материала [3] при холодной пластической деформации. Критерий повреждаемости материала определяется по формуле:

$$D = \int_0^{\bar{\epsilon}} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon},$$

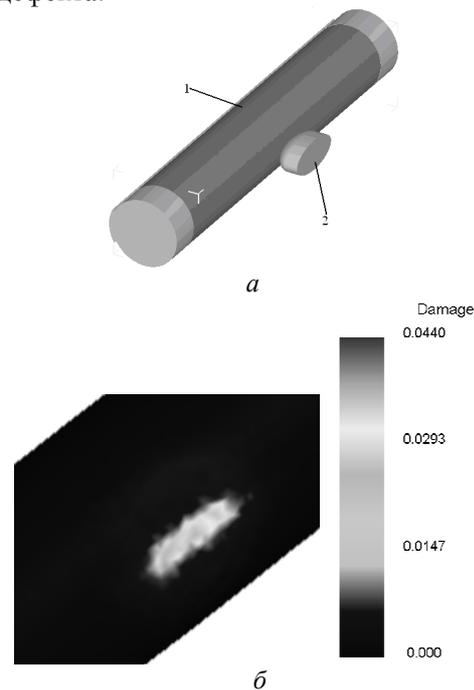
где  $\bar{\epsilon}$  – накопленная пластическая деформация;  $\sigma^*$  – максимальное главное растягивающее напряжение;  $\bar{\sigma}$  – интенсивность напряжений.

В качестве примера на рис. 1, а приведена расчетная модель, реализованная в пакете DEFORM-3D и позволяющая оценить повреждаемость материала в прямолинейном участке трубопровода наружным диаметром 550 мм и толщиной стенки  $s = 22$  мм при образовании дефекта с максимальной глубиной  $h = s$ , в результате воздействия на элемент трубопровода жесткого индентора, имеющего форму эллипсоида с соотношением осей 1:3. Рассматривалось как симметричное (продольное и поперечное) расположение дефекта относительно продольной оси трубы, так и под углами 30, 45 и 60 градусов.

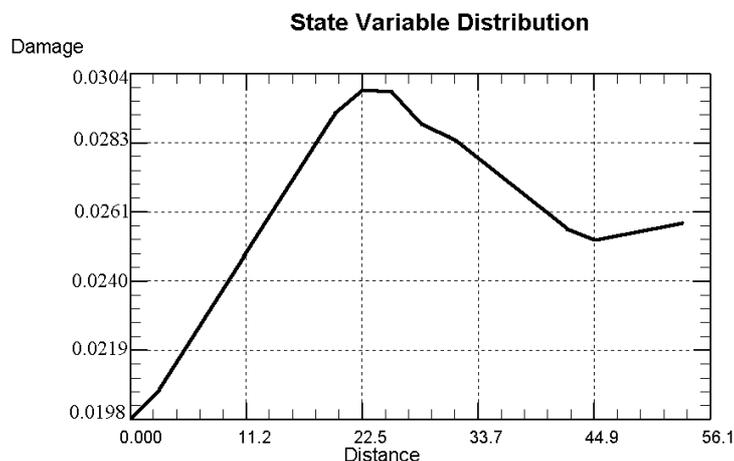
На рис. 1, б показана картина распределения параметра повреждаемости материала в зоне образовавшейся продольной вмятины, а на рис. 2 приведен график изменения этого параметра вдоль продольной оси от края вмятины до ее середины. Существенным является то, что максимум повреждаемости наблюдается в центральном продольном сечении, но не на краю и не в середине вмятины, а между ними. Это связано с особенностями пластического течения материала в областях с различным стеснением деформационных перемещений. Не менее важно и то, что последующее нагружение внутренним

постоянным давлением приводит к различному характеру распределения коэффициента концентрации напряжений в рассматриваемом сечении в зависимости от толщины стенки трубы.

На рис. 3 приведена зависимость максимального значения критерия повреждаемости в зависимости от угловой ориентации дефекта при его постоянной максимальной глубине. Установлено, что при поперечном расположении дефекта повреждаемость может достигать до 30 % от максимального значения критерия для данного материала. Наименьшая повреждаемость наблюдается при продольном расположении дефекта.



**Рис. 1.** Твёрдотельная модель (а) формирования вмятины и значение критерия повреждаемости материала (б): 1 – трубопровод; 2 – индентор



**Рис. 2.** Распределение критерия повреждаемости материала вдоль продольной оси от края вмятины до ее середины

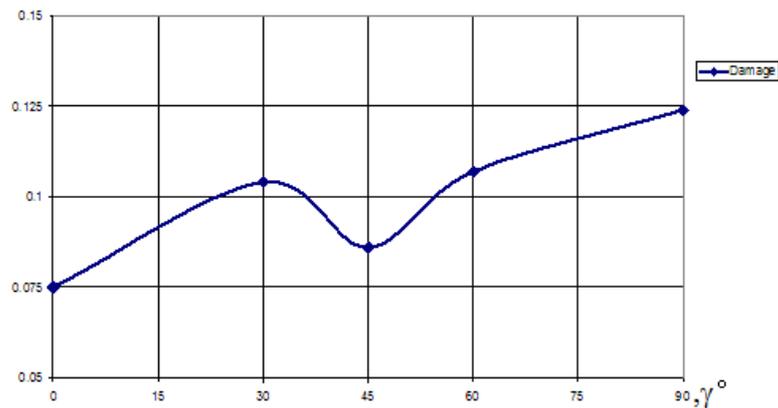


Рис. 3. Зависимость максимального значения критерия повреждаемости от угловой ориентации дефекта

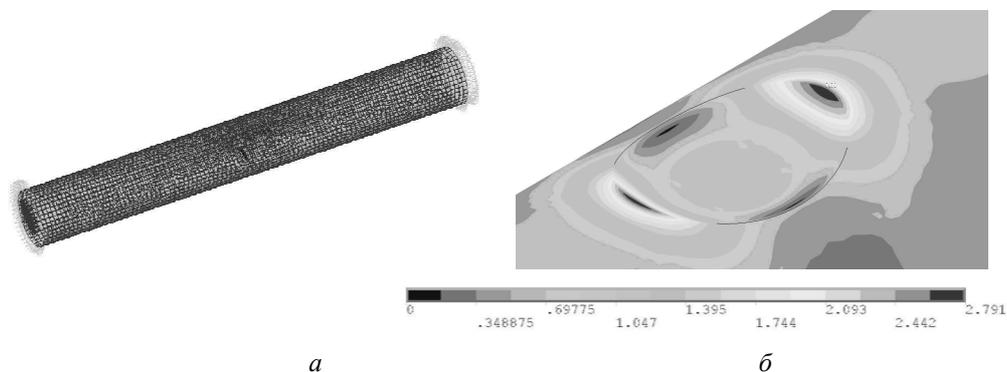


Рис. 4. Расчетная модель (а) и распределение интенсивности напряжений в зоне дефекта (б)

## 2. ОЦЕНКА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ

На рис. 4, а в качестве примера приведены расчетная модель участка трубопровода с дефектом, реализованная в пакете ANSYS с граничными условиями в виде ограничения перемещений конечных сечений и внутренним давлением, а также распределение интенсивности напряжений в зоне дефекта (рис. 4, б).

На рис. 5 показаны зависимости величины коэффициента концентрации напряжений вдоль продольной оси от края вмятины до ее середины в зависимости от толщины стенки трубы при прочих равных условиях. Показано, что увеличение толщины стенки трубы от  $s = 0,01D$  до  $s = 0,04D$  приводит как к изменению характера распределения интенсивности напряжений, так и к положению максимума. При малой относительной толщине стенки максимальная концентрация напряжений имеет место на краю вмятины, а при большой – в ее середине.

Таким образом, для оценки несущей способности конструкции с дефектами механиче-

ского происхождения наиболее целесообразно использование трехмерных расчетных моделей.

На рис. 6 приведена зависимость коэффициента концентрации напряжений  $k_\sigma^e$  в зависимости от относительной глубины вмятины  $h/s$ . Показано, что величина коэффициента концентрации нелинейно возрастает с увеличением относительной глубины вмятины.

На рис. 7 приведена зависимость коэффициента концентрации напряжений  $k_\sigma^e$  от радиуса индентора  $R_i$  при фиксированном отношении  $h/s = 1$ . Установлен практически линейный характер этой зависимости. При этом четырехкратное увеличение радиуса приводит к практически двукратному росту величины коэффициента концентрации.

На основании расчета параметров напряженно-деформированного состояния с учетом технологической наследственности, связанной с пластическим внедрением индентора, формирующего вмятину, получены значения коэффициентов концентрации напряжений.

### 3. ОЦЕНКА ДОПУСТИМОСТИ ДЕФЕКТА ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Известно, что наиболее эффективной оценкой местной напряженности материала в зоне конструктивного концентратора напряжений является определение коэффициентов концентрации напряжений и деформаций.

В технологическом трубопроводе, нагруженном внутренним давлением, в зоне дефекта возможны два состояния материала: упругое (если и номинальное и максимальное напряжения меньше предела текучести) и упругопластическое (если номинальное напряжение меньше предела текучести, а максимальное – больше).

При использовании подхода Нейбера [4] имеем:  $k_\sigma^e = k_\epsilon^e$  – упругость;  $k_\sigma^p \cdot k_\epsilon^p = (k_\sigma^e)^2$  или

$$\sigma_{\max} \cdot \epsilon_{\max} = \frac{\sigma_n^2}{E} (k_\sigma^e)^2 \text{ – упругопластичность.}$$

Таким образом, коэффициенты концентрации напряжений и деформаций при упругопластическом деформировании зависят не только от формы и размеров концентратора, но и от величины номинальных напряжений и механических характеристик материала.

Для понимания значимости каждого из этих коэффициентов показательная следующая оценка. Допустим, что  $\sigma_n = [\sigma]$ , а  $\sigma_{\max} = \sigma_T$ , тогда

$$k_\sigma^p = S_T \text{ и } k_\epsilon^p = \frac{(k_\sigma^e)^2}{S_T}.$$

Таким образом, значения коэффициента концентрации деформации могут существенно отличаться по величине в зависимости от коэффициента концентрации напряжений в области упругости. Следовательно, при определении долговечности конструктивных элементов с механическими дефектами целесообразнее использовать деформационные критерии и коэффициент концентрации пластических деформаций.

Известно, что за пределами упругости кривая деформирования материала может быть описана степенной функцией  $\sigma = C \cdot \epsilon^n$ .

При этом величина предельной деформации обычно связывается с величиной относительного сужения при растяжении

$$\epsilon_{\lim} = \ln \frac{1}{1 - \psi}.$$

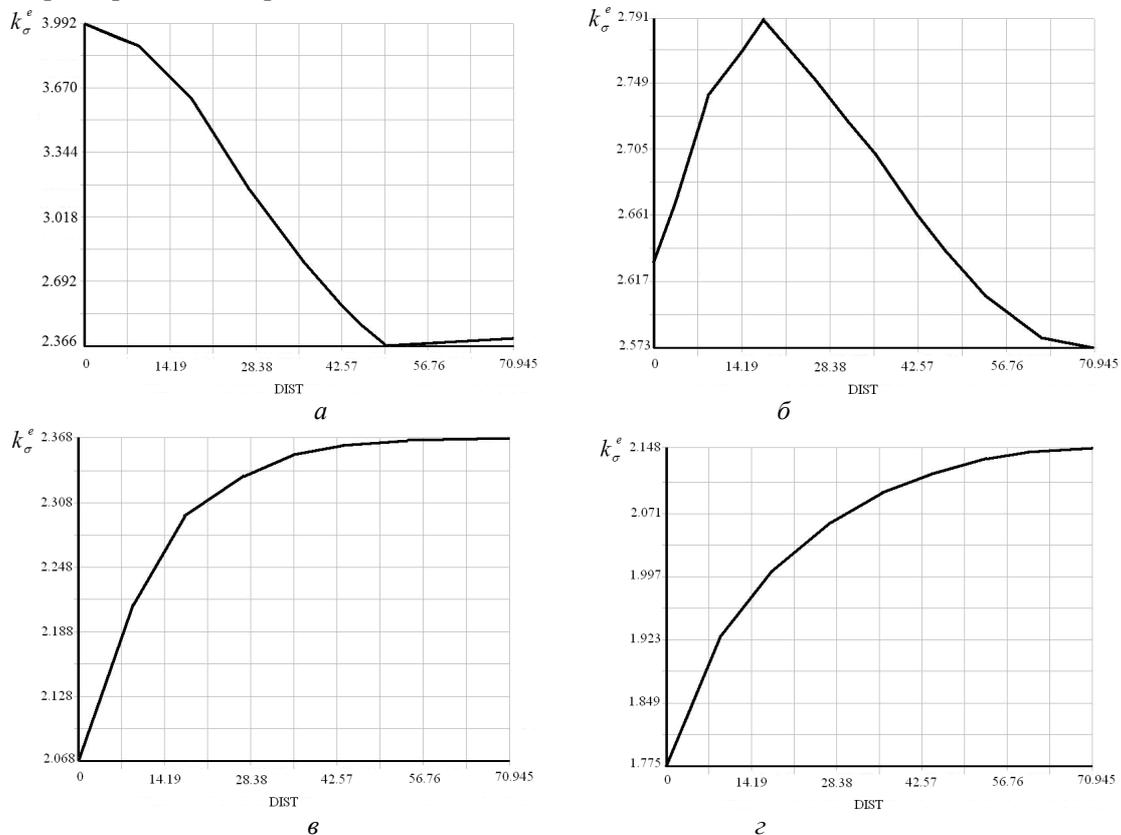


Рис. 5. Распределение коэффициента концентрации напряжений  $k_\sigma^e$  вдоль продольной оси от края вмятины до ее середины:  $a - s = 0,01D$ ;  $б - s = 0,02D$ ;  $в - s = 0,03D$ ;  $г - s = 0,04D$

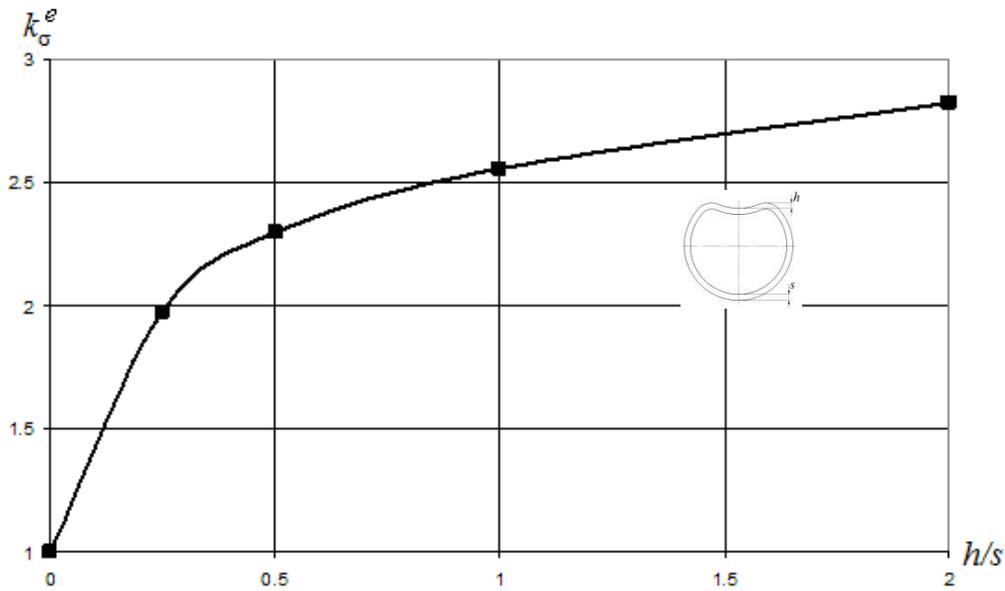


Рис. 6. Зависимость коэффициента концентрации напряжений  $k_{\sigma}^e$  от относительной глубины вмятины  $h/s$

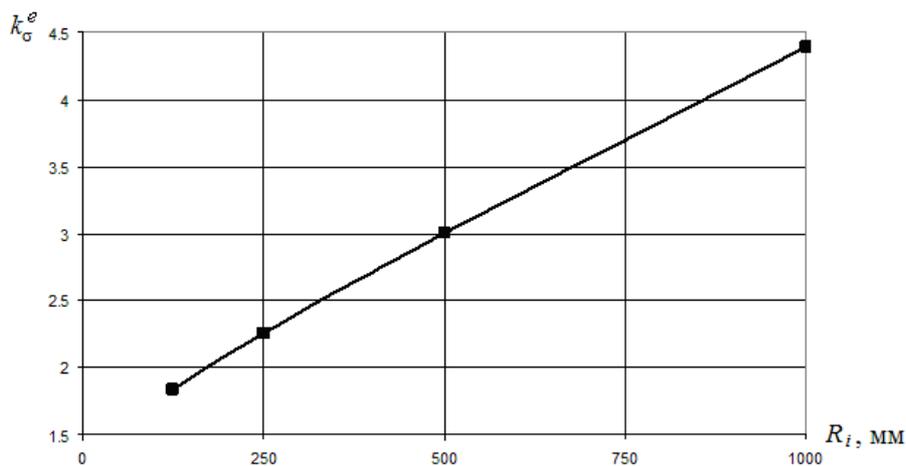


Рис. 7. Зависимость коэффициента концентрации напряжений  $k_{\sigma}^e$  от радиуса индентора  $R_i$

Это позволяет на основании зависимости Нейбера оценить величину предельного значения коэффициента концентрации деформации:

$$k_{\varepsilon_{\text{lim}}} = \frac{\varepsilon_{\text{lim}}}{n}.$$

Учитывая, что концентрацию напряжений и деформаций можно определить численными методами с учетом реальной геометрии дефекта, его допустимость можно определить соотношением

$$k_{\varepsilon}^p < k_{\varepsilon_{\text{lim}}}.$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании численных методов механики деформируемого твердого тела предложена методика оценки допустимости дефекта механического происхождения типа вмятины на трубе технологического трубопровода.

Оценена величина критерия повреждаемости материала трубы при образовании дефекта эллипсоидной формы в результате холодного пластического деформирования при различных углах наклона продольной оси дефекта к продольной оси трубы. Показано, что наибольшую степень повреждаемости, составляющую до 30% от предельно допустимой, материал приобретает при поперечном расположении дефекта.

При этом область максимальной повреждаемости не всегда совпадает с краевыми и срединными точками осей симметрии вмятины, что подтверждает необходимость трехмерных расчетных моделей, основанных на реальной геометрии дефекта.

Определены зависимости коэффициента концентрации напряжений от относительной глубины и кривизны вмятины при нагружении трубы постоянным внутренним давлением.

Оценена допустимость дефекта при статическом нагружении в условиях упругого и упругопластического состояния материала с учетом величины коэффициента концентрации деформации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ANSYS User`s Manual for version 14.0. Theory.
2. Deform 3D User`s Guide.
3. Дель Г. Д. Технологическая механика. М.: Машиностроение, 1978. 174 с.
4. Махутов Н. А. Сопротивление элементов конструкций разрушению. М.: Машиностроение, 1973. 200 с.

#### ОБ АВТОРАХ

**Будилов Игорь Николаевич**, проф. каф. сопротивления материалов. Дипл. инженер по технологии и оборудованию сварочн. произв-ва (УГАТУ, 1998). Д-р техн. наук по тепловым двигателям летательн. аппаратов (ЧПИ, 1972). Иссл. в обл. механики разрушения, прочности элементов ГТД.

**Кулясов Геннадий Викторович**, техн. дир. ООО «Техническая диагностика». Дипл. инженер по машинам и обработке металлов давлением (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. механики деформируемого твердого тела, прочности элементов конструкций нефтехим. оборудования.

**Лукашук Юрий Валентинович**, доц. каф. ОКМиМ. Дипл. инженер по автоматизации машиностроительн. пром-ти (УАИ, 1972). Канд. техн. наук по тепл. двигателям летательн. аппаратов (УАИ, 1981). Иссл. в обл. прочности и надежности элементов конструкций методами комп. моделирования.

**Шевела Владислав Владимирович**, зав. отд. ГУП «БашНИИнефтемаш». Дипл. инженер по материаловедению в машиностроении (УГАТУ, 1996). Иссл. в обл. механики деформируемого твердого тела, прочности элементов конструкций нефтехим. оборудования.