

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ДЕФЕКТОВ СПЛОШНОСТИ ПРИ ЭКСПЕРТИЗЕ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ВОЗДУХОСБОРНИКА

Е.М.Сигова

Учреждение Российской академии наук Специальное конструкторско-технологическое бюро
«Наука» Красноярского научного центра Сибирского отделения РАН, Красноярск

COMPUTATIONAL ESTIMATION FOR DANGER OF CONTINUITY DEFECTS DURING EXPERTISE OF THE AIR RECEIVER CATASTROPHIC DESTRUCTION

E.M.Sigova

The Institution of the Russian Academy of Science Special Design and Technological Bureau
"Science" of Krasnoyarsk Scientific Centre of the Siberian Branch of RAS, Krasnoyarsk

The problem of computational estimation for danger of continuity defects during expertise of the air receiver catastrophic destruction for the purpose of initiation destructions place definition is raised and solved.

Согласно имеющимся сведениям на территории трансформаторной подстанции произошло разрушение воздушного ресивера емкостью 5 м³ с разбросом осколков на 40 – 50 м. В результате разрушения были повреждены соседние ресиверы, разрушена кирпичная стена здания компрессорной подстанции, повреждены опоры ЛЭП. Воздухосборник находился в эксплуатации с 1968 г. Сосуд был нагружен внутренним рабочим давлением 4 МПа (40 атм.).

По результатам визуального осмотра фрагментов разрушенного сосуда (развертка ресивера с обозначенными на ней фрагментами, найденными после аварии, представлена на рис. 1) было обнаружено два трещиноподобных дефекта в сварных швах приварки штуцера и люка к корпусу. Поскольку оба эти дефекта являются потенциальными инициаторами хрупкого разрушения сосуда, была поставлена задача расчетной оценки опасности дефектов сплошности при экспертизе катастрофического разрушения воздухосборника с целью определения места инициации разрушения.

Данная задача была решена следующим образом. С помощью метода конечных элементов выполнялся анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) для заданной геометрии сосуда при указанном внутреннем рабочем давлении с учетом веса конструкции и особенностей конструкции опорной части. Расчет выполнен на основании данных, указанных в Паспорте сосуда и Заключении СДА 66.2-05-560-2008, результатов визуального осмотра фрагментов разрушенного сосуда, и данных протоколов механических испытаний металла образцов, вырезанных из фрагментов сосуда.

В соответствии с Паспортом сосуда и Заключением СДА 66.2-05-560-2008 сосуд имел следующие геометрические характеристики: внутренний диаметр – 1200 мм, толщина стенки обечайки – 20 мм, высота цилиндрической части сосуда – 4000 мм, толщина днища – 24 мм, высота днища – 374 мм, толщина горловины люка – 65 мм, высота горловины люка – 200 мм.

Модель сосуда представлена на рис. 2.

Согласно Паспорту основные элементы сосуда (обечайки, днища) изготовлены из стали 16ГС. Горловина люка изготовлена из стали 20. Сталь 16ГС относится к классу конструкционных низколегированных сталей (заменителями являются стали 17ГС, 18Г2С, 20ГС) для сварных конструкций. Нормативные характеристики механических свойств стали 16ГС для листа толщиной 10-20 мм: временное сопротивление $\sigma_b = 450-490$ МПа, предел текучести $\sigma_T = 320-325$ МПа.

Дефекты сварного соединения горловины люка с обечайкой и штуцера с обечайкой моделировались в соответствии с данными визуально-измерительного и неразрушающего контроля фрагментов разрушенного сосуда.

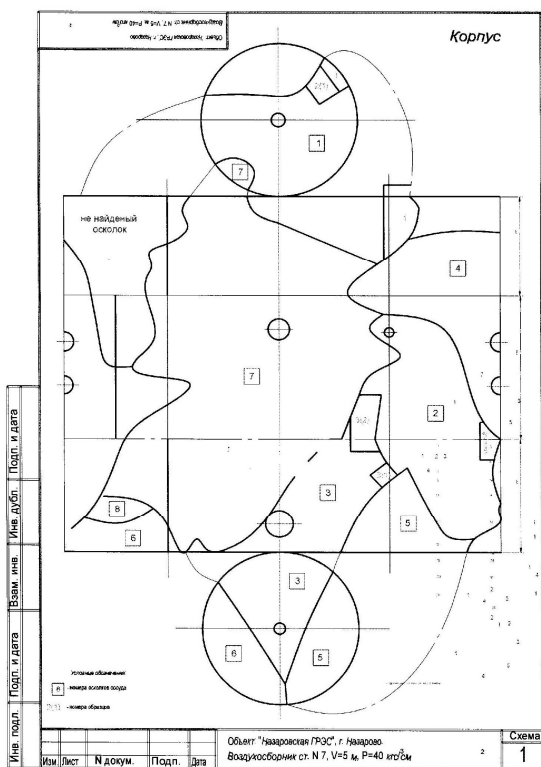


Рис. 1. Развертка ресивера с обозначенными на ней фрагментами, найденными после аварии

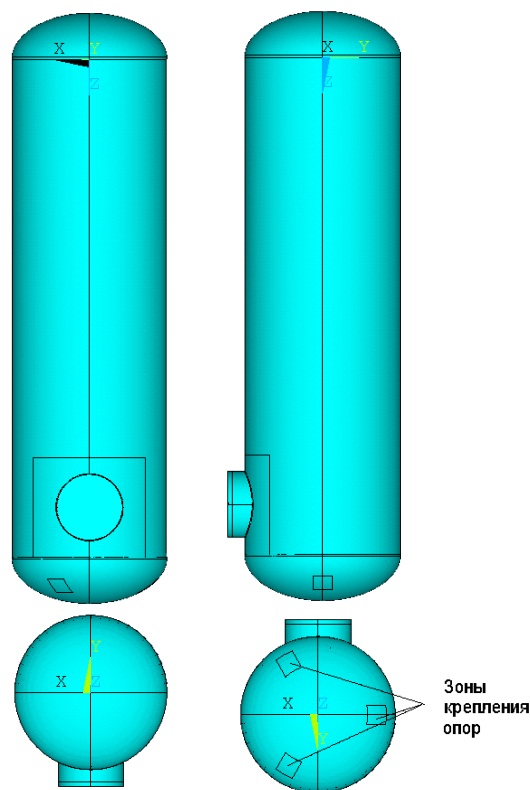


Рис. 2. Общий вид модели сосуда

Непровар сварного соединения горловины люка с обечайкой представлен несплошностью длиной 150 мм и шириной 14 мм в месте стыка люка и обечайки между внутренним и наружным сварными швами (рис. 3). В качестве особенности разработанной твердотельной модели можно отметить следующее. Во-первых, учтены форма и размеры сварных швов люка и обечайки в соответствии с чертежами воздухосборника. Во-вторых, выполнено введение в модель на уровне примитивов и разделение поверхностей сплавления внутреннего и внешнего шва с люком, обечайки с люком (для обеспечения видимости этих поверхностей на некоторых рисунках люк убран). Это дало возможность выделить поверхность непровара и обеспечить по ней несвязность объемов люка и обечайки и несовместность сеточных областей. Таким образом, смоделирован дефект в виде несплошности нулевой толщины.

Конечно-элементная модель содержала 1 299 853 узла и 857 178 объемных 10-тиузловых тетраэдральных конечных элементов. Расчет выполнялся с достаточно грубой дискретизацией сетки по модели с последующим измельчением в области дефекта со средним размером ребра конечных элементов 0,5 мм. Характер получаемых при этом сеточных областей представлен на рис. 4.

В рамках экспертизы отсутствуют временные возможности заниматься исследованиями сходимости. Поэтому в данной задаче использован такой уровень измельчения сетки, при котором достигалась сходимость при решении других задач такого класса.

Численные расчеты при заданных геометрических характеристиках и внутреннем давлении показали, что максимальные перемещения стенок сосуда составляют 1,153 мм. Общий характер напряженного состояния представлен распределением интенсивности напряжений (рис. 5). Как следует из рисунка, интенсивность напряжений в среднем по сосуду не превышает 118 МПа.

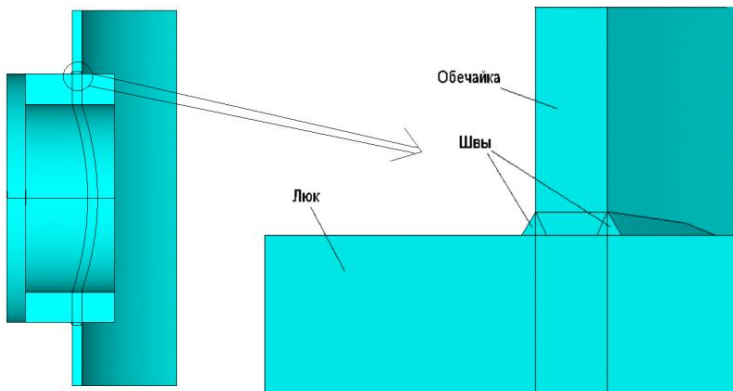


Рис. 3. Общий вид зоны дефекта в соединении горловины люка с обечайкой

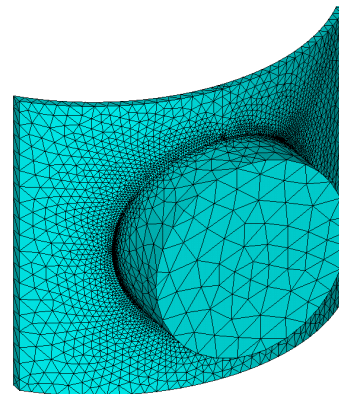


Рис. 4. Особенности конечно-элементной дискретизации модели в области дефекта

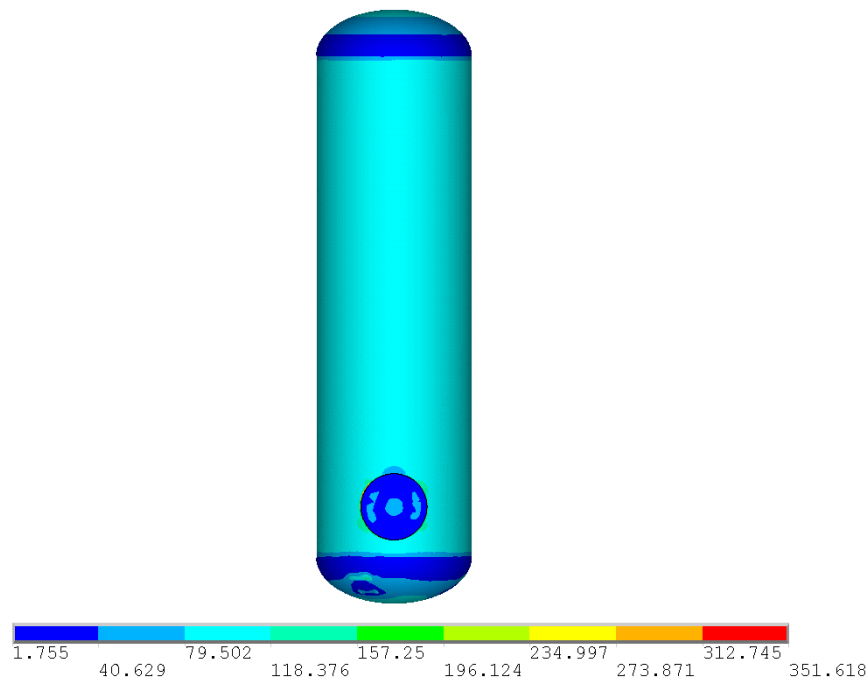


Рис. 5. Характер распределения интенсивности напряжений в сосуде

Анализ локальных напряжений в зоне горловины с внешней стороны люка показывает, что в области дефекта максимальные локальные напряжения достигают 350 МПа (рис. 6, а). При этом из-за наличия непровара характер распределения напряжений не симметричен относительно центральных осей горловины – левый нижний участок сварного соединения оказывается перегруженным только изнутри ресивера, а левый верхний участок (в области дефекта) перегружен по всей толщине стенки. При отсутствии дефекта НДС практически симметрично относительно как вертикальной, так и горизонтальной осей люка.

Анализ локальных напряжений в зоне горловины люка с внутренней стороны сосуда представлен на рис. 6, б. Как следует из рисунка, в отличие от внешней стороны, сильно перегруженными оказываются участки сварного соединения как выше, так и ниже горизонтальной плоскости, проходящей через ось люка.

Анализ напряженно-деформированного состояния непосредственно сварных швов в области непровара представлен на рис. 7. Как видно из рисунка, наиболее нагруженным является участок шва в области непровара изнутри воздухосборника. Максимальный уровень напряжений для участка шва на наружной стороне сосуда не превышают 344 МПа, тогда как для участка шва с внутренней стороны эти напряжения составляет 352 МПа.

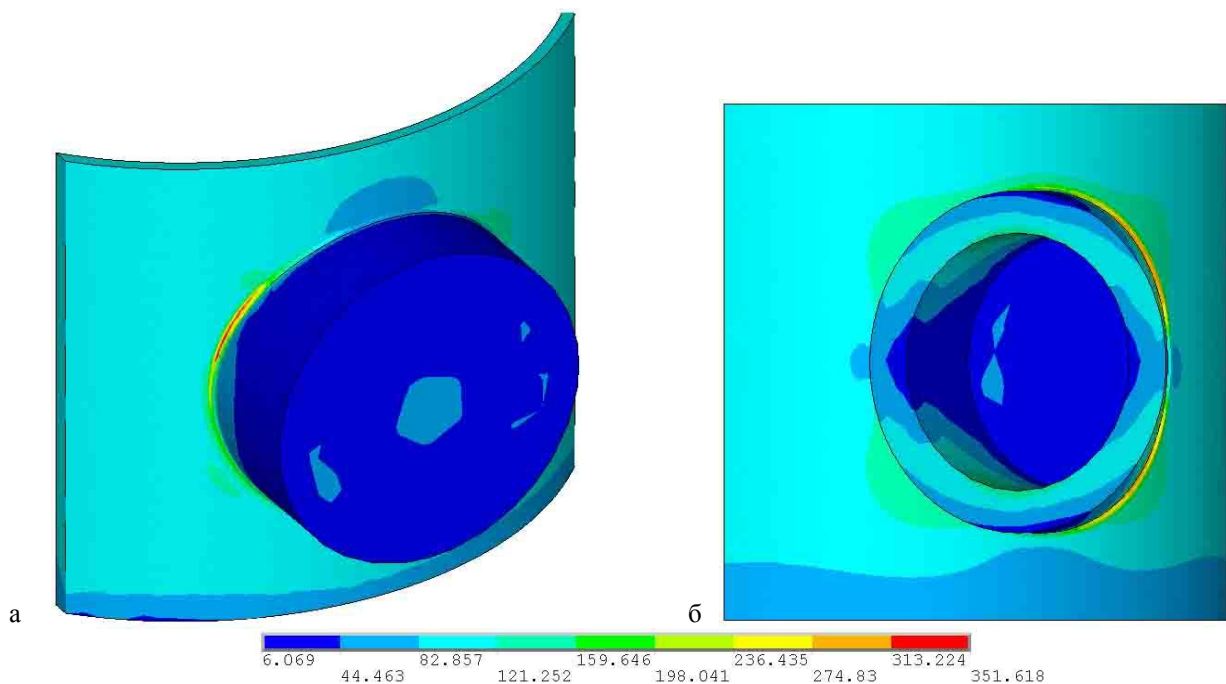


Рис. 6. Распределение интенсивностей напряжений в зоне горловины люка: а – с внешней стороны сосуда; б – люка с внутренней стороны сосуда

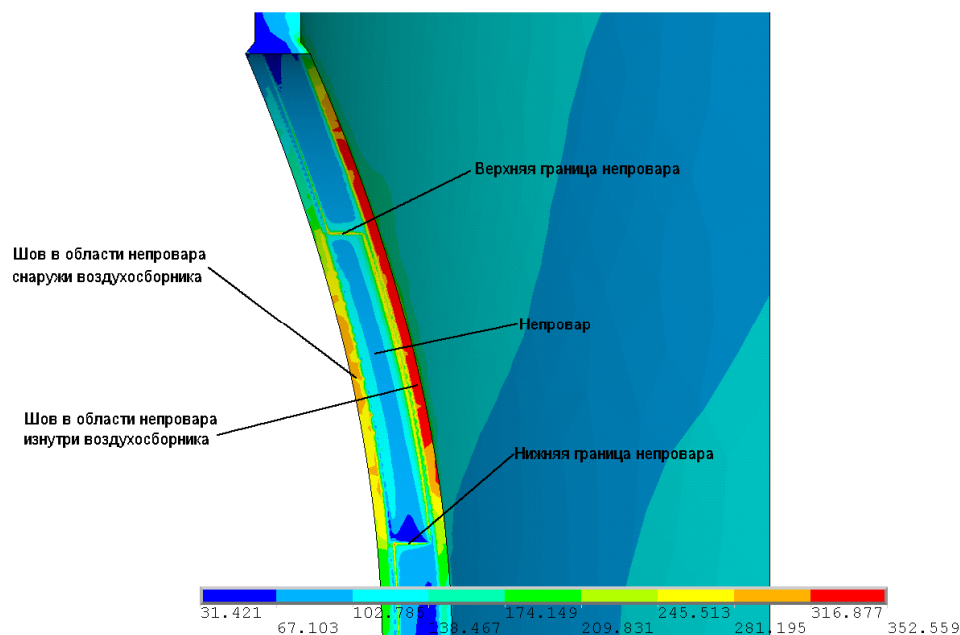


Рис. 7. Распределение интенсивностей напряжений в сварных швах в области непровара

Непровар сварного соединения штуцера с обечайкой представляет собой объемный дефект со сторонами 16 и 1 мм по всей длине шва. Поскольку люк и рассматриваемый штуцер находятся на значительном удалении друг от друга (рис. 8), а влияние дефекта на НДС конструкции носит локальный характер, то для уменьшения размерности задачи при расчете дефекта в штуцере дефект в люке не учитывается. Как и в случае с люком, в соответствии с чертежами воздухоборника учтены форма и размеры сварных швов штуцера и обечайки. Конечно-элементная модель содержит 1 146 893 узла и 918 778 объемных 10-тиузловых тетраэдральных конечных элементов. Для возможности сопоставления результатов по обоим дефектам дискретизация сетки выполнялась с измельчением среднего размера ребра конечных элементов в области дефекта до 0,5 мм аналогично предыдущему дефекту (рис. 9).

Анализ распределения локальных напряжений в зоне врезки штуцера (рис. 10) показывает, что максимальные локальные напряжения при наличии дефекта достигают 325 МПа. Как видно из распределения интенсивностей напряжений в разрезе в зоне врезки штуцера с непроваром (рис. 11), максимальные напряжения сосредоточены сверху и снизу на внутренней стороне штуцера вблизи краев непровара.

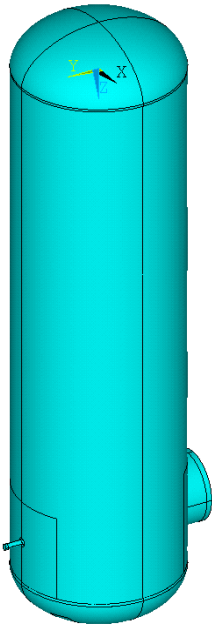


Рис. 8. Общий вид модели сосуда с учетом штуцера

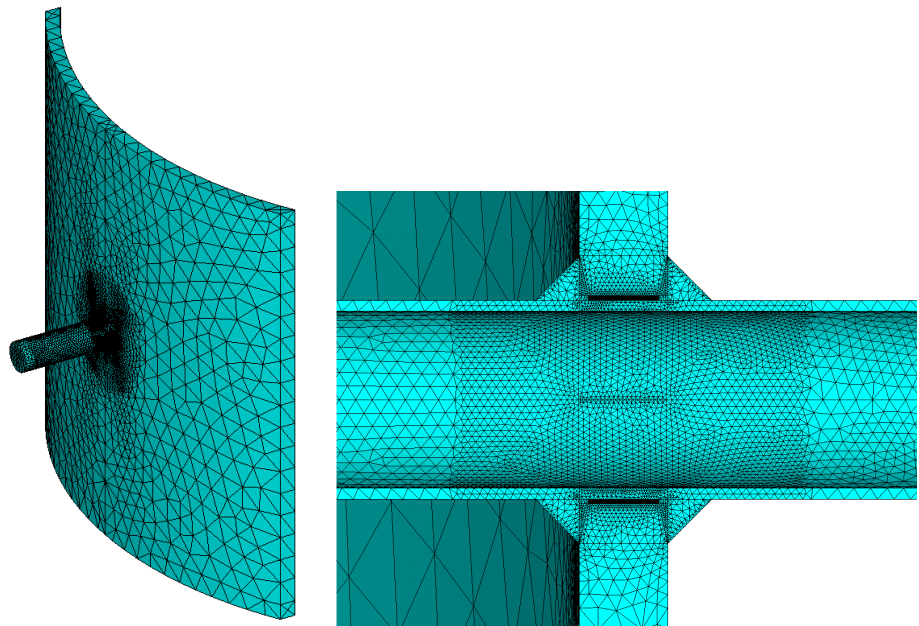


Рис. 9. Общий вид зоны дефекта в соединении штуцера с обечайкой и особенности конечно-элементной дискретизации модели в области дефекта

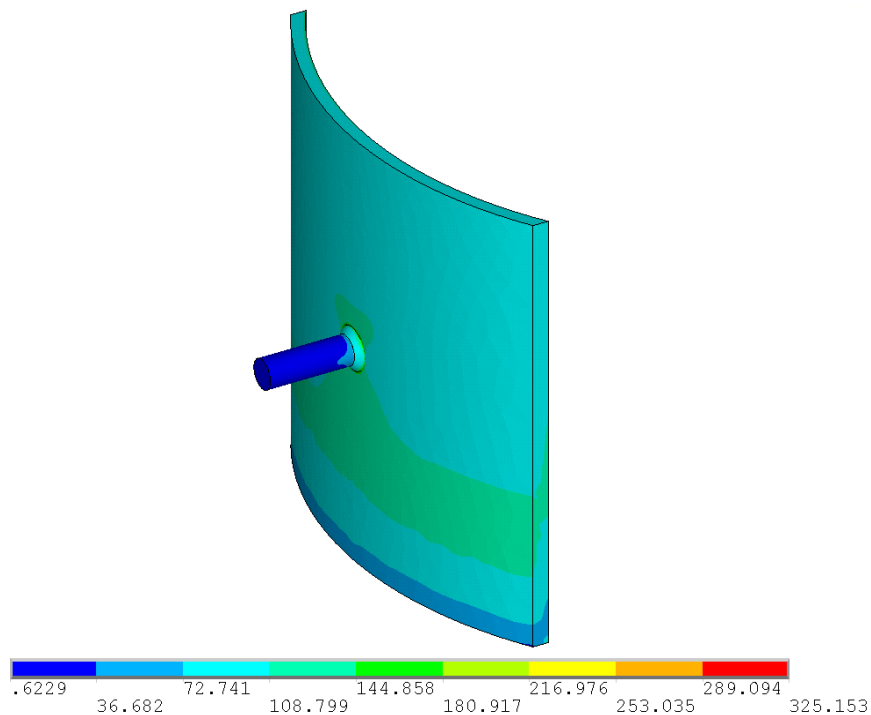


Рис. 10. Распределение интенсивностей напряжений в зоне врезки штуцера

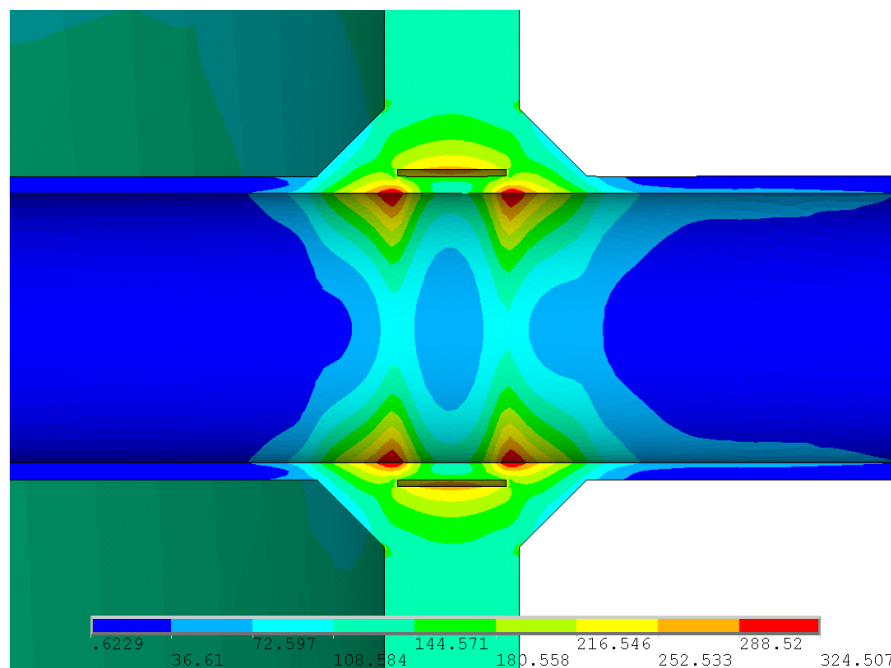


Рис. 11. Распределение интенсивностей напряжений в зоне врезки штуцера с неповаром (в разрезе)

Анализ напряженно-деформированного состояния показывает, что локальные напряжения в зоне обоих дефектов существенно (почти в 3 раза) превышают номинальные напряжения.

Исходя из характера напряженно-деформированного состояния сосуда в области неповара сварного соединения горловины люка с обечайкой и штуцера с обечайкой, и уровня этих напряжений можно полагать, что сосуд эксплуатировался при напряжениях, близких к предельным напряжениям для металла сварных швов.

Выводы по результатам расчетного анализа.

1. Напряженно-деформированное состояние сосуда характеризуется высокими локальными напряжениями в области неповара сварного соединения горловины люка с обечайкой и штуцера с обечайкой. Напряжения в сварных швах в области неповара в люке достигают 344 – 352 МПа, что выше предела текучести металла, а в области неповара в штуцере – 325 МПа, что практически совпадает с пределом текучести.

2. Расчетные номинальные критические напряжения для сосуда сопоставимы с номинальными напряжениями в стенке обечайки при заданном рабочем давлении. Максимальные локальные напряжения в области дефекта превышают предел текучести металла. Это позволяет констатировать, что сосуд длительное время эксплуатировался при нагрузках, близких к критическим.

3. По результатам расчетов (и визуально-измерительного контроля) источником разрушения сосуда является конструктивно-технологический дефект в виде неповара в сварном соединении обечайки с горловиной люка. Как видно из рис.1, непосредственно в месте его расположения проходит траектория хрупкой трещины. Можно полагать, что именно разрушение участка шва приварки люка к обечайке с внутренней стороны привело к хрупкому разрушению всего сосуда.

Предложенная технология экспертизы катастрофических разрушений применима не только к воздухооборникам, но и к любым сосудам давления и аппаратам, представляющим собой конструкции оболочечного типа, широко использующимся в различных отраслях промышленности.