

**Ксения Владимировна СЫЗРАНЦЕВА** —  
доцент кафедры кибернетических систем  
Тюменского государственного нефтегазового университета,  
кандидат технических наук

**Юрий Иванович КНЯЗЕВ** —  
генеральный директор ЗАО НПП «Сибтехноцентр»

**Евгений Вадимович СЕНЬКОВ** —  
зам. генерального директора по развитию  
ЗАО НПП «Сибтехноцентр»

*kv.syzr@gmail.com*

УДК 622.276.05-192: 519.6

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КОРПУСА ПРЕВЕНТОРА  
COMPUTER SIMULATION OF PROCESS OF PREVENTOR BODY  
HYDRAULIC TEST**

**АННОТАЦИЯ.** Рассматривается метод компьютерного моделирования процесса гидравлических испытаний корпусных деталей в программном комплексе ANSYS на примере корпуса превентора. Даны рекомендации по выбору расчетной схемы, описанию свойств материала и оценке качества построения модели и ее адекватности физическому процессу нагружения.

**SUMMARY.** The article considers the method of computer simulation of process of bodies hydraulic tests by program complex ANSYS. Body of preventor is used as an example. The authors give recommendations for choosing the loading scheme, description of material properties, evaluating of mesh density and its adequacy to real loading process.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА.** Надежность, напряженно-деформированное состояние, превентор, компьютерное моделирование, ANSYS.

**KEY WORDS.** Reliability, stress-strain condition, preventor, computer simulation, ANSYS.

Для выполнения требований безопасности при бурении и эксплуатации нефтяных и газовых скважин в настоящее время обязательным является установка и использование превенторов, обеспечивающих герметизацию устья скважин. Эксплуатация превенторов проходит в тяжелых условиях (высокое давление, перепады температур и т. д.) и напрямую связана с безопасностью, что определяет высокие требования к их качеству и надежности. С целью обеспечения безопасности корпусные детали превенторов проходят испытания на герметичность и прочность при двойном рабочем давлении. В связи с этим проектирование и производство новых конструкций превенторов представляет собой долгий и дорогостоящий процесс, связанный с проведением целого ряда испытаний опытных образцов и доработкой изделия.

Вместе с тем, на сегодняшний момент развитие численных методов позволяет выполнять моделирование различных физических процессов [1], что широко используется в различных отраслях — от медицины до атомной энергетики и аэрокосмических программ. Научно-производственное предприятие «Сибтехноцентр» в настоящее время занимается внедрением в процесс проектирования новых образцов превенторов численных методов с целью сокращения сроков постановки изделий на производство и повышения качества и безопасности выпускаемой продукции. В настоящей статье рассмотрены этапы и особенности реализации компьютерного моделирования процесса

гидравлических испытаний корпусных деталей в программном комплексе ANSYS на примере корпуса преентора ППГ-230×35.

Задачу по моделированию процесса гидравлических испытаний корпуса необходимо решать в двойной нелинейной постановке, с учетом геометрических (контактные взаимодействия между корпусом преентора, крышками, испытательным стендом) и физических (нелинейный закон деформирования материала) нелинейностей, при нагружении рабочим давлением 35 МПа и пробным давлением 70 МПа. Результатом моделирования гидравлических испытаний являются данные напряженно-деформированного состояния корпуса преентора для последующей оценки его надежности.

Расчетная схема, используемая для выполнения моделирования процесса гидравлических испытаний в программном комплексе ANSYS, представлена на рис. 1. Конечно-элементные модели корпуса и испытательного стенда строятся на основе импортированных в программный комплекс ANSYS геометрических моделей, выполненных в САД-системах, это позволяет значительно упростить процесс создания моделей. Поскольку геометрическая модель корпуса обладает сложной пространственной формой, является толсто-стенной и интерес представляет, в том числе, и распределение напряжений и деформаций по толщине стенок корпуса, конечно-элементная модель строится с использованием трехмерного структурного элемента Solid92 [2].

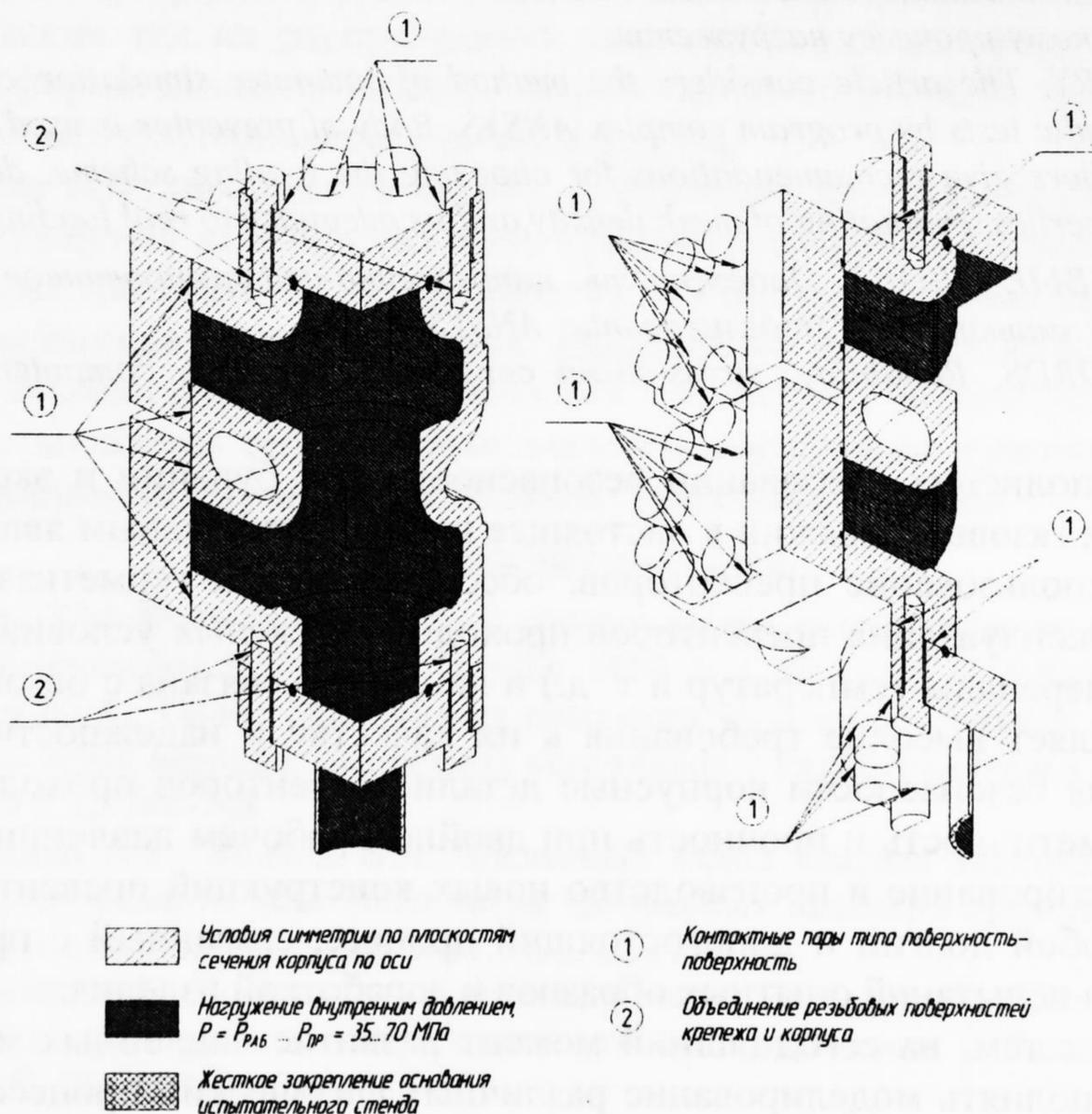


Рис. 1. Расчетная схема моделирования процесса гидравлических испытаний

Для моделирования контактных взаимодействий между крышками и корпусом, а также крышками и крепежом используются пары элементов Target170 и Conta174 [3], моделирующие деформируемо-деформируемый контакт с учетом трения [4]. Для моделирования испытаний исследуемого корпуса было создано 7 групп контактных взаимодействий, причем для по-

строения конечно-элементных моделей испытательного стенда и крепежных деталей была использована бóльшая длина грани элемента, поскольку распределение напряжений в этих деталях не представляет непосредственного интереса, необходимо лишь оценить их влияние на жесткость корпуса пре-вентора.

На рис. 2 представлены конечно-элементные модели корпуса и испытательного стенда.

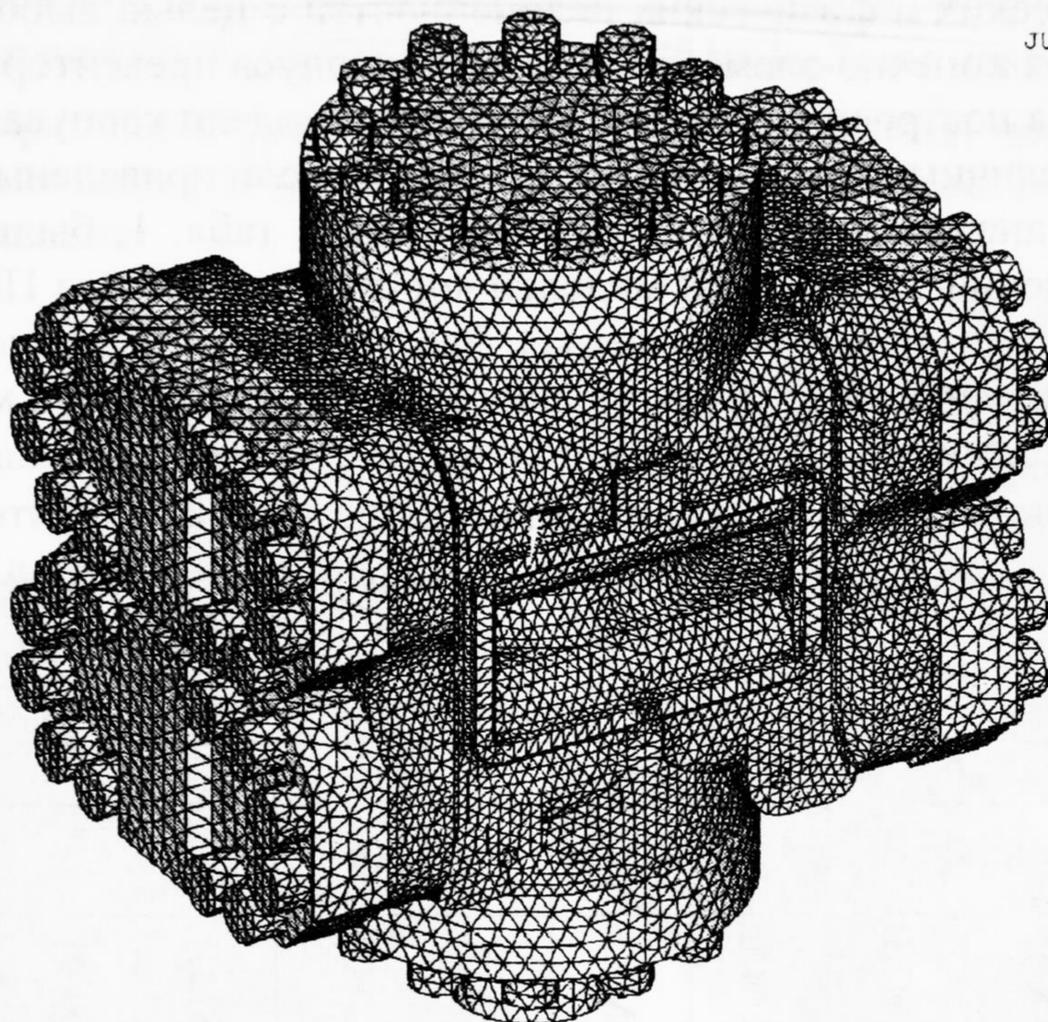


Рис. 2. Конечно-элементные модели для симуляции процесса гидравлических испытаний с учетом условий симметрии

Поскольку пропорциональный закон деформирования для металлов характерен только до предела пропорциональности, а материал корпуса пре-вентора при гидравлических испытаниях подвергается деформации, существенно его превышающей (материал подвергается пластическому деформированию), то необходимо описывать кривую деформирования материала, или описывать свойства материала в несколько упрощенном виде в соответствии с мультилинейным законом деформирования, аппроксимирующим реальную кривую деформирования металла при помощи сплайна [3].

Оценку качества построения конечно-элементной модели целесообразно выполнять методом, изложенным в работе [5], где предложено использовать оценку полученных результатов по формулам:

$$\Delta_1 = \frac{ESOL - NSOL}{ESOL} \cdot 100\%, \quad (1)$$

и

$$\Delta_2 = \frac{SMXB - SMX}{SMXB} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $ESOL$  — результаты в центрах масс элементов;  $NSOL$  — результаты, усредненные по узлам элементов;  $SMXB$  — оценка вероятной верхней границы результатов.

Поскольку расчеты деталей, имеющих такую сложную геометрию как превентор, в двойной нелинейной постановке представляют собой сложный итерационный процесс поиска решения системы более миллиона дифференциальных уравнений [1], время вычислений в зависимости от используемого компьютера может варьироваться от суток до недели и более. Поэтому более рационально перед моделированием процесса гидравлических испытаний выполнить цикл расчетов по упрощенным расчетным схемам без использования геометрических и физических нелинейностей с целью выбора оптимальных параметров конечно-элементной модели корпуса превентора. Результаты оценки качества построения конечно-элементной модели корпуса по формулам (1) и (2) для различных параметров построения модели приведены в табл. 1.

На основе анализа данных, представленных в табл. 1, были определены параметры конечно-элементных моделей корпуса превентора ППГ-230×35 и испытательного стенда, используемых для дальнейших расчетов. Однако проведенный анализ качества построения конечно-элементной модели не исключает необходимости оценивать полученные результаты для каждого из шагов нагружения как минимум по одному критерию  $\Delta_1$  (1), чтобы избежать ошибок, которые могут возникнуть из-за изменений в расчетной схеме.

Таблица 1

Оценка качества построения конечно-элементной модели корпуса

ESIZE, мм		20		18		16		15		14	
Эл-тов Solid92		87682		123954		151419		178665		212554	
ESOL	Значение	SMX	SMXB	SMX	SMXB	SMX	SMXB	SMX	SMXB	SMX	SMXB
	SEQV, МПа	1005	1150	1018	1181	1101	1236	1018	1154	1039	1314
NSOL	Значение	SMX	SMXB	SMX	SMXB	SMX	SMXB	SMX	SMXB	SMX	SMXB
	SEQV, МПа	864,5	999,9	875,8	997,1	879,8	1014	917,3	1033	919,1	1014
$\Delta_1, \%$		13,98		13,97		20,09		9,89		11,54	
$\Delta_2, \%$ для ESOL		12,61		13,80		10,92		11,79		20,93	
$\Delta_2, \%$ для NSOL		13,47		12,17		13,24		11,20		9,36	

Рассмотрим результаты моделирования процесса гидравлических испытаний корпуса превентора ППГ-230×35 с помощью двух шагов нагружения, соответствующих испытаниям корпуса рабочим и пробным давлениями.

На первом шаге нагружения моделировался случай испытания корпуса рабочим давлением 35 МПа.

При выполнении оценки качества конечно-элементной модели по критерию  $\Delta_1$  применительно к данной модели (рис. 2) и расчетной схеме (рис. 1) получаем значение:

$$\Delta_1 = \frac{ESOL - NSOL}{ESOL} \cdot 100\% = \frac{298,378 - 286,402}{298,378} \cdot 100\% = 4,01\%, \quad (3)$$

что позволяет утверждать, что имеющаяся конечно-элементная модель может использоваться для выполнения расчетов по данной расчетной схеме.

На рис. 3 показаны поля распределений эквивалентных напряжений по энергетической теории прочности (фон Мизеса) во всех используемых в процессе моделирования моделях. Верхним пределом полей распределения является предел текучести стали 30ХМЛ  $\sigma_{0,2} = 285$  МПа. Зоны локализации эквивалентных напряжений, превышающие указанные пределы полей распределения, отмечены белым цветом. Для наглядности отрисовка сетки конечных элементов погашена.

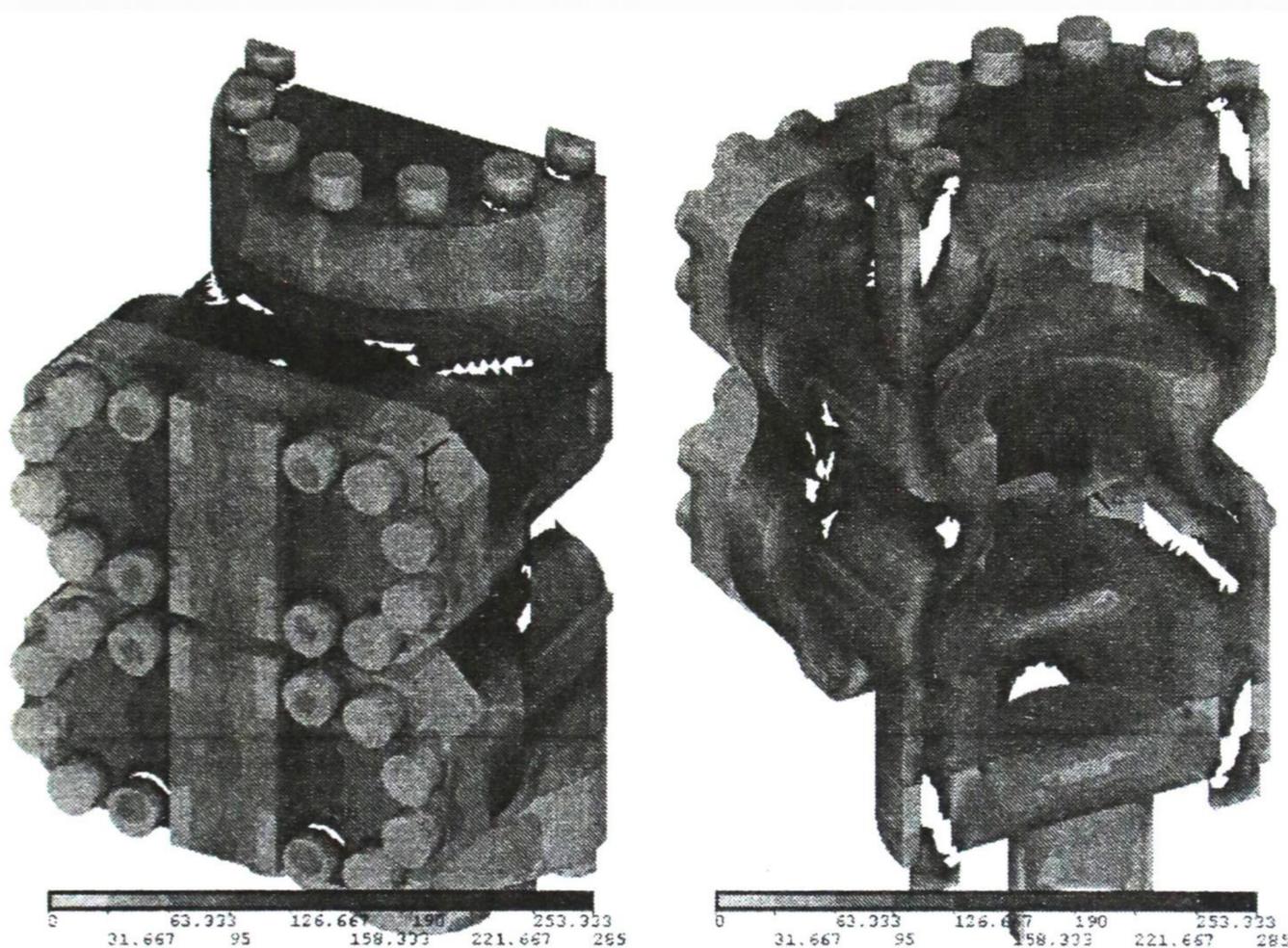


Рис. 3. Поля распределения эквивалентных напряжений SEQV в моделях корпуса и приспособления испытательного до предела текучести

Результаты, полученные на этом шаге нагружения, хорошо согласуются с результатами расчетов, выполненными для корпуса превентора ППГ-230х35,001-01 без моделирования испытательного стенда. С учетом того, что при моделировании процесса гидравлических испытаний отсутствовало жесткое закрепление нижнего фланца корпуса, было получено более симметричное распределение напряжений по корпусу.

Локализация участков, где напряжения превышают предел текучести, на местах сопряжений различных типов поверхностей на внешней поверхности корпуса (рис. 3) не представляет какого-либо существенного интереса, так как реальная модель корпуса проходит механическую обработку после отливки, и данной концентрации напряжений наблюдаться не будет. Однако локализация напряжений на внутренних радиусах сопряжений поверхностей говорит о недостаточном усилении этих участков, как это рекомендуется в [6] для давлений свыше 6,4 МПа.

На втором шаге нагружения рассматривался случай испытания корпуса пробным давлением 70 МПа. Выполненная оценка качества конечно-элементной модели по критерию  $\Delta_1$  для этого шага нагружения дает значение:

$$\Delta_1 = \frac{ESOL - NSOL}{ESOL} \cdot 100\% = \frac{529,987 - 525,622}{529,987} \cdot 100\% = 0,82\% . \quad (4)$$

Конечно-элементная модель может использоваться для выполнения расчетов по данной расчетной схеме.

На рис. 4 показаны поля распределений эквивалентных напряжений по энергетической теории прочности (фон Мизеса) во всех используемых моделях. Верхним пределом полей распределения является предел текучести стали 30ХМЛ  $\sigma_{0,2} = 285$  МПа. Зоны локализации эквивалентных напряжений, превышающие указанный предел полей распределения, отмечены белым цветом.

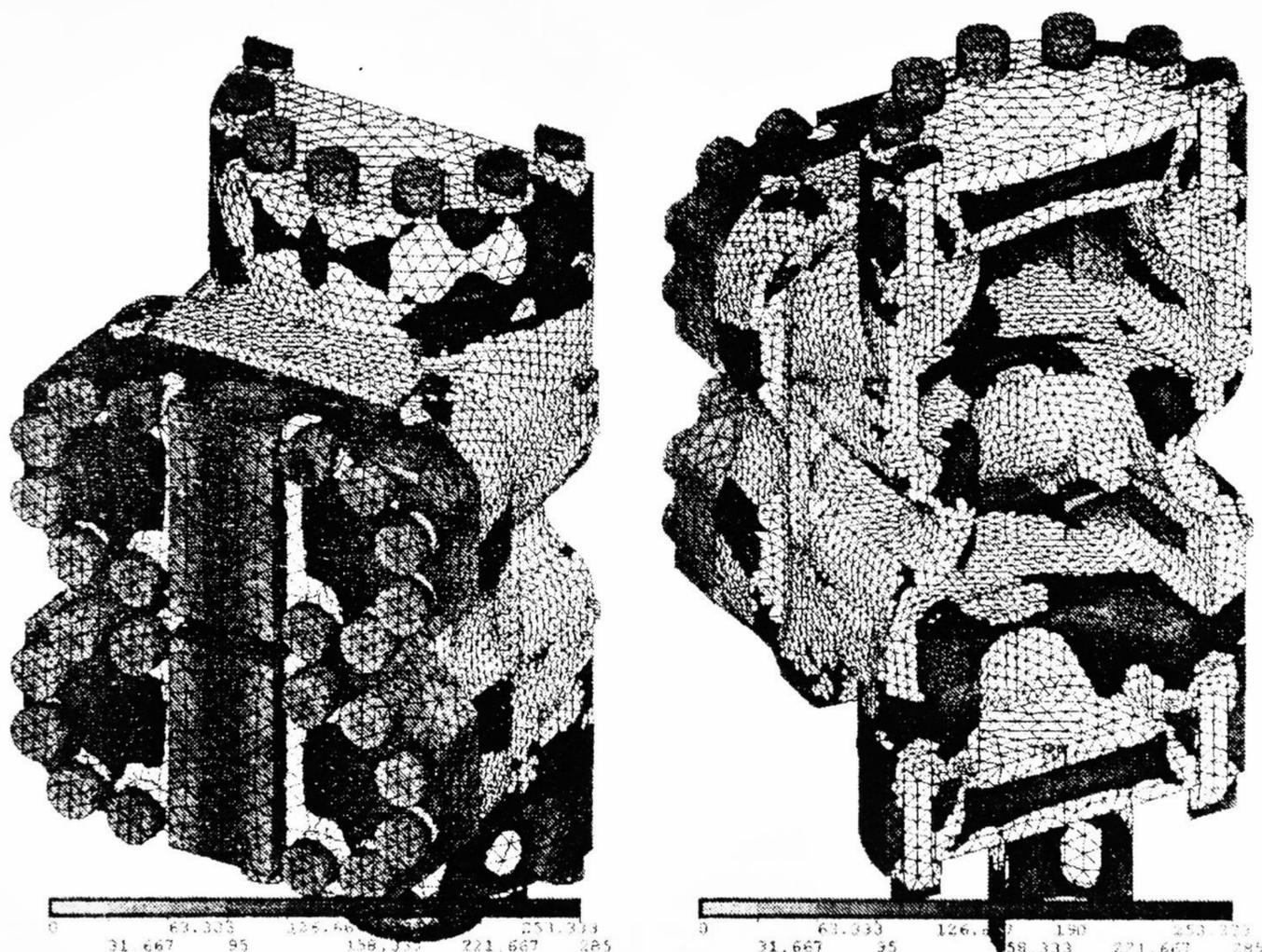


Рис. 4. Поля распределения эквивалентных напряжений SEQV в моделях корпуса и приспособления испытательного до предела текучести

На рис. 5 и 6 приведены поля распределения эквивалентных напряжений и суммарных перемещений только в исследуемом корпусе, исключая стенд, крышки и крепежные детали. Верхним пределом полей распределения напряжений на рис. 5 является предел прочности стали 30ХМЛ  $\sigma_B = 530$  МПа. Зоны локализации эквивалентных напряжений, превышающие указанный предел полей распределения, отмечены белым цветом. Поля распределения суммарных перемещений (рис. 6) показаны на модели с реальным масштабом деформаций, на которой сплошной тонкой линией показан контур недеформированного корпуса.

Анализ представленных на рис. 4, 5 и 6 результатов и сопоставление их с результатами, полученными при расчете корпуса превентора без учета испытательного стенда, отражает ожидаемые изменения в картине распределения напряжений в корпусе, обусловленные отсутствием жестких закреплений.

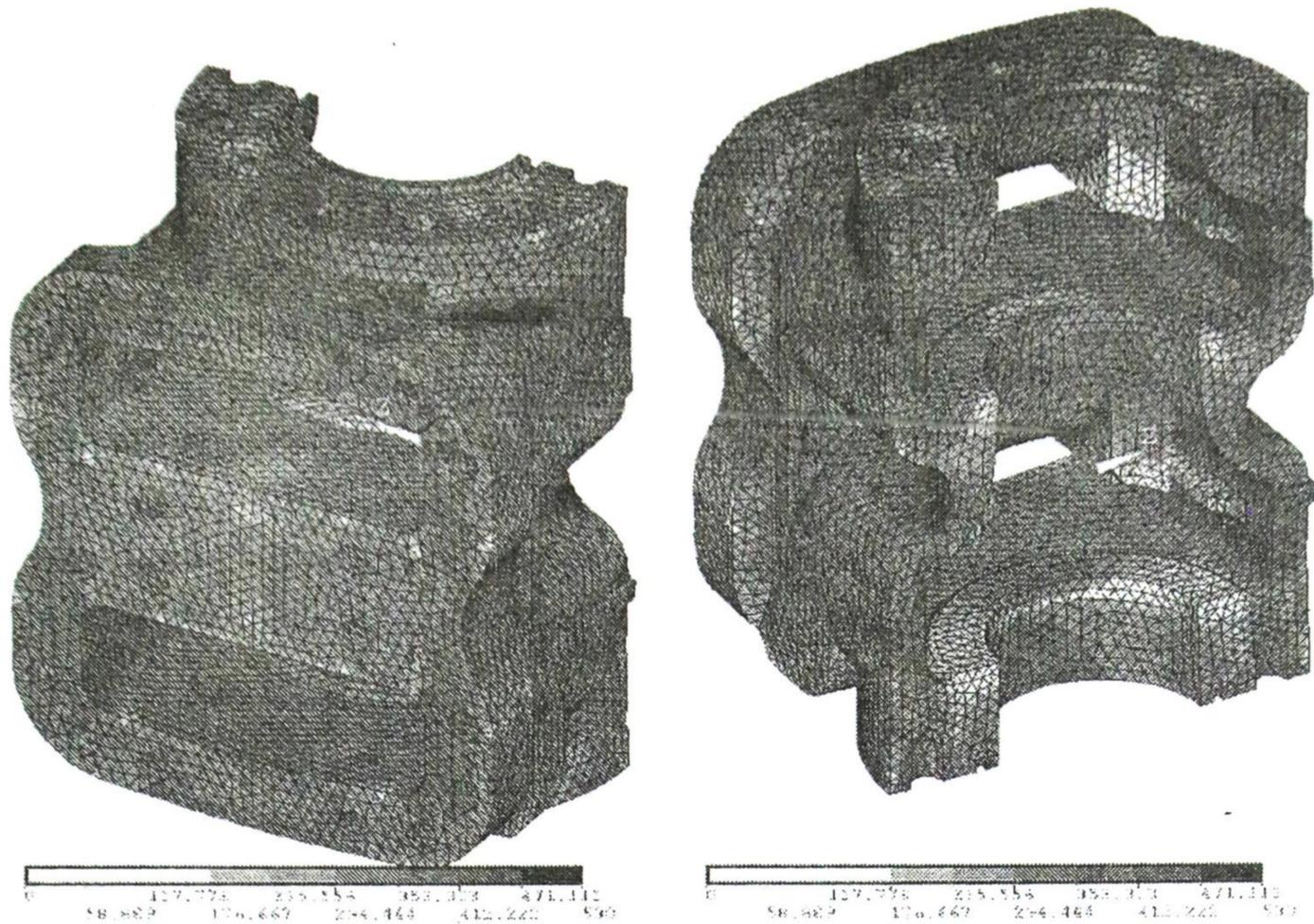


Рис. 5. Поля распределения эквивалентных напряжений SEQV в корпусе до временного сопротивления

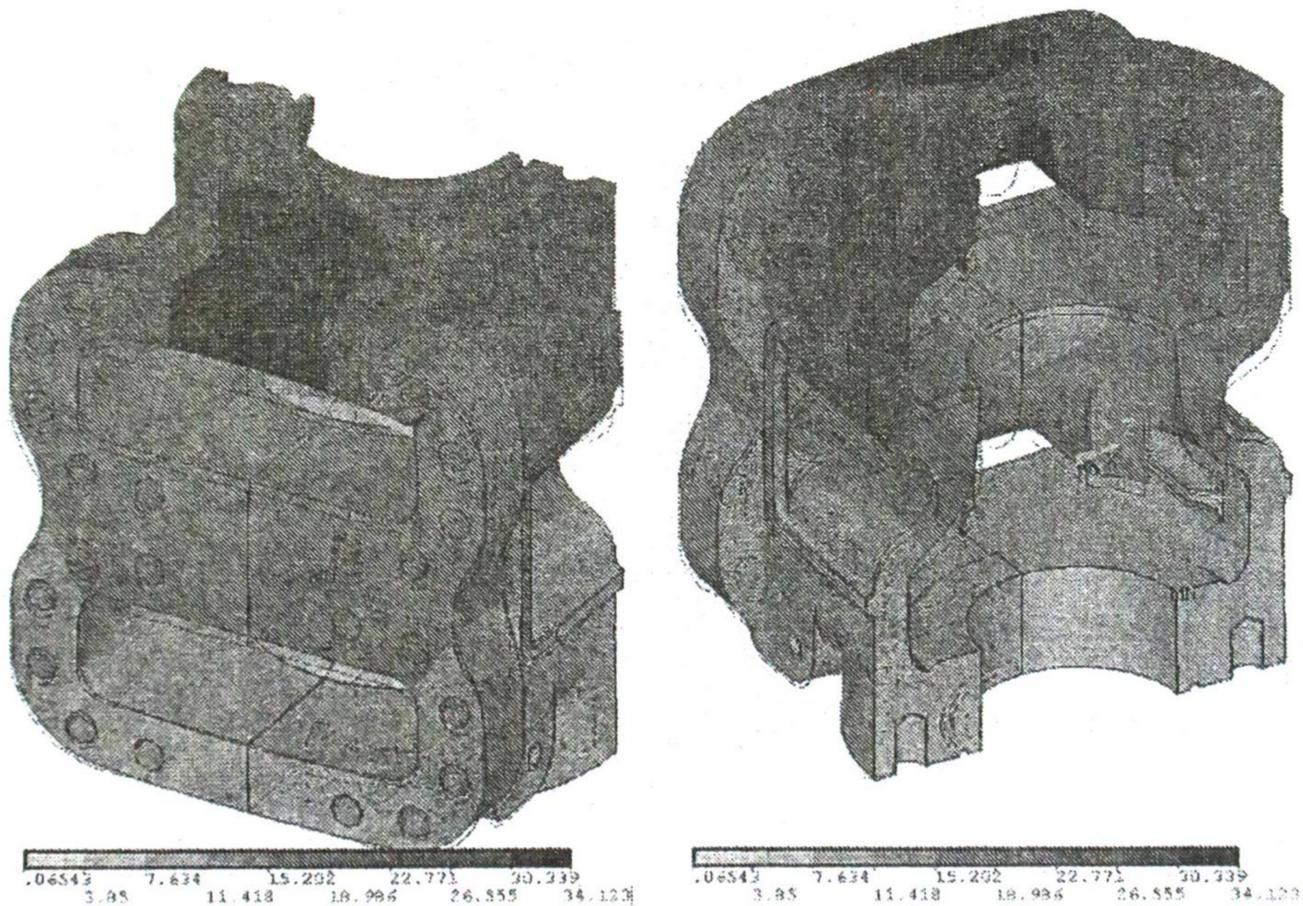


Рис. 6. Поля распределения суммарных перемещений USUM в корпусе

Проведенное компьютерное моделирование процесса гидравлических испытаний корпуса преентора в специализированном конечно-элементном программном комплексе ANSYS позволяет решить следующие задачи.

1. Выявить зоны корпуса, испытывающие пластические деформации, а также зоны, напряжения в которых превышают предел прочности материала с учетом коэффициента запаса прочности, поскольку разрушение материала в этих зонах будет неизбежным. Компьютерное моделирование позволяет установить максимальное давление, при котором корпус еще сохраняет работоспособность, а в случае недостаточной надежности корпуса для заданного давления провести его доработку для последующих испытаний.

2. Определить опасные места концентрации напряжений, выявить максимальные их значения, а также размер локализации. Эта информация является исходной для осуществления конструкторской оптимизации детали (возможно увеличить недостаточные радиусы сопряжений, добавить необходимые ребра жесткости и др.).

Компьютерное моделирование процесса гидравлических испытаний корпуса превентора ППГ-230×35 позволило установить его недостаточную прочностную надежность при нагружении пробным давлением 70 МПа, хотя при рабочем давлении 35 МПа корпус сохраняет работоспособность. Выполненные на испытательном стенде «НПП «Сибтехноцентр» экспериментальные исследования подтвердили полученные в ходе компьютерного моделирования результаты.

Основные этапы и рекомендации для выполнения компьютерного моделирования испытаний корпуса превентора, изложенные в данной работе, применимы для оценки надежности практически любых корпусных деталей и сборочных конструкций, работающих под давлением, в том числе испытывающих большие пластические деформации. Они могут быть также использованы при моделировании работы других моделей превенторов, а также запорной и фонтанной арматуры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сызранцева К.В. Компьютерный анализ нагруженности и деформативности элементов нефтегазового оборудования. Тюмень: ТюмГНГУ, 2009. 124 с.
2. Сызранцев В.Н., Сызранцева К.В., Белобородов А.В. Использование метода конечных элементов для расчета напряженно-деформированного состояния корпусных деталей клиновых задвижек // Известия ВУЗов. Нефть и газ. 2007. № 4. С. 38-43.
3. ANSYS Element Reference. ANSYS Release 9.0 Documentation. ANSYS Inc., 2004.
4. Белобородов А.В. Оценка надежности трубопроводной арматуры // ANSYS Solutions. Русская редакция. 2006. № 2. С. 4-9.
5. Crawford, J. Evaluating Mesh Density // Ansys Solutions. Vol. 1. 1999. № 2. P. 12-16.
6. Гуревич Д.Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры М.-Л.: Машиностроение, 1964. 832 с.