

мальные потери массы шихты, связанные с выделением углекислого газа. Полученные результаты указывают на возросшую химическую активность шихт на стадии силикатообразования.

Изучение активности шихт на стадии стеклообразования осуществляли по результатам сравнительных лабораторных варок с использованием рентгенофазового метода анализа. Варку компактированных стекольных шихт для производства тарного стекла, приготовленных из традиционных сырьевых материалов и на основе туганского песка, проводили в электрической печи. Скорость нагрева печи составляла 5 град/мин. Пробы стекломассы для РФА отбирали в интервале температур 900...1200 °С. О скорости процесса стеклообразования судили по изменению интенсивности максимумов отражения, соответствующих кварцу ($d = 3,34 \text{ \AA}$).

Как видно из рис. 3, в интервале температур 900...1000 °С не наблюдается заметного различия интенсивности максимумов отражения кварца для обеих шихт. При температуре 1100...1200 °С значения абсолютных интенсивностей максимумов отражения уменьшаются, причем более значительное

(приблизительно в 1,5 раза) уменьшение соответствует образцам стекла, сваренного из шихты на основе туганского песка.

Результаты проведенных исследований показали, что использование обогащенного песка Туганского месторождения приводит к увеличению химической активности шихт на стадии силикато- и стеклообразования, что обусловлено не только тонкодисперсностью песка и особенностями строения его зерен, но и тесным контактом реагирующих компонентов, который достигается при компактировании стекольной шихты методом непрерывного прессования на валковом прессе.

Лабораторные образцы тарного стекла, сваренного из шихт на основе туганского песка, по физико-химическим свойствам не отличаются от свойств стекол, выработанных на основе традиционных сырьевых материалов.

Таким образом, экспериментально установлено, что обогащенный туганский песок может быть использован в качестве кварцсодержащего сырья в технологии тарного стекла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Парюшина О.В., Мамина Н.А., Панкова Н.А., Матвеев Г.М. Стекольное сырье России. — М.: Высшая школа, 1995. — 84 с.
2. Поляк В.В., Саркисов П.Д., Солинов В.Ф., Царицын М.А. Технология строительного и технического стекла и шлакопескосталлов. — М.: Стройиздат, 1993. — 183 с.

3. Липин Н.Г., Орлова Л.А., Панкова Н.А. Оценка окислительно-восстановительных потенциалов стекольных шихт // Стекло и керамика. — 1993. — № 11–12. — С. 12–13.

УДК 539.3

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КЛАПАНА ХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА

Б.А. Люкшин*, П.А. Люкшин, Н.Ю. Матолыгина, М.В. Липовка**

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН. г. Томск

E-mail: natmat@ispms.tsc.ru

* Томский университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: borisljuk@mail.ru

** Томский нефтехимический комбинат

Дается обоснование предлагаемых изменений в конструкции аварийного клапана химического реактора высокого давления. Численными методами теории упругости проведен анализ напряженно-деформированного состояния сопрягаемых деталей клапана. Параметрическими исследованиями получен вариант сопряжения элементов клапана, обеспечивающий герметизацию химического реактора.

Введение

Во время работы химического реактора рабочее давление газа в нем достигает 200 МПа. Аварийный клапан должен герметично закупоривать реактор до тех пор, пока давление в нем не превышает определенного предела, и сбрасывать излишки давления в атмосферу, если рабочее давление превышает допустимое. Естественно, что аварийный клапан

должен иметь конструктивные особенности, которые исключают утечку газа при штатном рабочем давлении. В действующей конструкции аварийного клапана между двумя сопрягаемыми металлическими поверхностями вставлялась серебряная проволока (кольцо), которая должна была служить герметиком (уплотнением) и предотвращать утечку газа через зазор между сопрягаемыми поверхностями

ми. Недостатком такой конструкции является наличие дополнительной сопрягаемой детали в узле, которая по регламенту подлежит замене при каждом ремонте или разборе клапана.

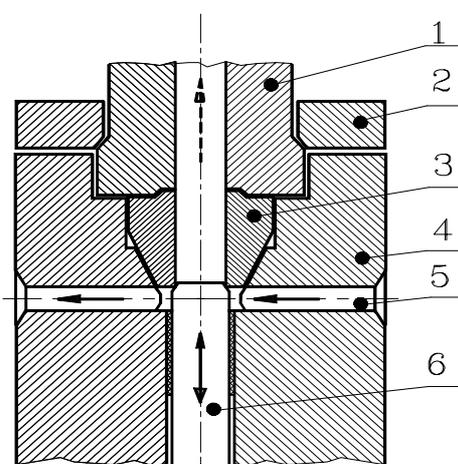


Рис. 1. Схема аварийного сбросного клапана: 1) штуцер; 2) нажимной фланец; 3) конусное седло; 4) корпус; 5) канал; сплошной стрелкой показано направление движения газа в рабочем режиме, штриховой при сбросе давления; 6) плунжер, стрелкой показаны направления его движения

Наряду с действующей предлагается более простая конструкция клапана (рис. 1), в которой сопрягаемые металлические поверхности имеют вид усеченного конуса. Преимущество такого технического решения заключается в устранении дополнительной детали в узле сопряжения и упрощение процедуры сборки клапана при его ремонте. Если угол конусности седла клапана и основания клапана (корпуса) совпадают, напряжения в зоне контакта равномерно распределены по всей площади усеченного конуса. Если же угол расточки седла клапана и его основания отличаются на один или несколько градусов, то напряжения в зоне контакта возрастают, а сама зона контакта при несопадении углов конусности уменьшается.

Величина зоны контакта и параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) седла и основания клапана рассчитываются исходя из соотношений теории упругости.

Основные соотношения теории упругости. Метод решения

В осесимметричной задаче теории упругости кручение отсутствует, компонента перемещений v вдоль координаты θ равна нулю, компоненты u и w не зависят от θ (рис. 2) [1].

Деформации вдоль осей r, θ, z , а также деформация сдвига в плоскости rz равны:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial U}{\partial r}; \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{U}{r}; \quad \varepsilon_{rz} = \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial r}.$$

Ненулевые компоненты тензора напряжений связаны с компонентами тензора деформаций следующими соотношениями:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{rz} \end{Bmatrix} = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{vmatrix} 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \end{vmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{rr} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{\theta\theta} \\ \varepsilon_{rz} \end{Bmatrix},$$

или в компактной форме:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}.$$

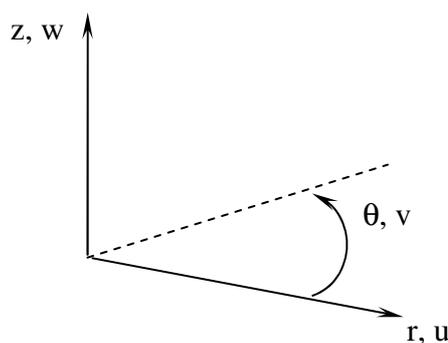


Рис. 2. Оси и перемещения вдоль осей цилиндрической системы координат

Осесимметричная задача теории упругости в данной работе решается методом конечных элементов (МКЭ) [2]. Компоненты перемещений U, W аппроксимируются внутри треугольного конечного элемента линейной функцией. Соотношения между деформациями и перемещениями в матричной форме имеют вид:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{U\}.$$

$[B]$ – матрица градиентов – имеет вид:

$$[B] = \frac{1}{2A} \begin{vmatrix} b_i & 0 & b_j & 0 & b_k & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_k \\ \frac{2AN_i}{r} & 0 & \frac{2AN_j}{r} & 0 & \frac{2AN_k}{r} & 0 \\ c_i & b_i & c_j & b_j & c_k & b_k \end{vmatrix};$$

где

$$a_i = r_j z_k - r_k z_j; \quad b_i = z_j - z_k; \quad c_i = r_k - r_j;$$

$$N_i = \frac{1}{2A}(a_i + b_i r + c_i z); \quad A = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & r_i & z_i \\ 1 & r_j & z_j \\ 1 & r_k & z_k \end{vmatrix}.$$

Коэффициенты $a_j, b_j, c_j, a_k, b_k, c_k$ функции формы N_j, N_k получают круговой перестановкой индексов i, j, k .

После того, как определены матрицы $[D]$ и $[B]$, нетрудно определить матрицу жесткости конечного элемента для осесимметричной задачи теории упругости в виде:

$$[K^e] = \int_v [B]^T [D] [B] dV; \quad (1)$$

где $dV=2\pi r dA$ элементарный объем тора, полученного вращением сечения dA вокруг оси.

Если в формуле (1) матрицы $[D]$ и $[B]$ содержат только постоянные величины, то они могут быть вынесены из под знака интеграла. Однако матрица $[B]$ содержит коэффициенты, являющиеся функциями координат. Заменяем переменные величины r и z их средними значениями \bar{r} и \bar{z} каждом конечном элементе, тогда матрица жесткости для конечных элементов в осесимметричной задаче теории упругости примет вид [2]:

$$[K^e] = \int_V [\bar{B}]^T \cdot [D] \cdot [\bar{B}] \cdot 2\pi \cdot \bar{r} A,$$

где $[\bar{B}]$ – матрица коэффициентов, в которой вместо переменных величин r, z используются их средние значения по элементу.

Матричное уравнение для ансамбля элементов имеет вид:

$$[K] \cdot \{U\} = \{F\}$$

где $[K]$ – глобальная матрица жесткости, которая собирается из матриц жесткости элементов отдельных элементов $[K^e]$, $\{F\}$ – глобальный вектор-столбец нагрузки.

Вектор-столбец нагрузки $\{F\}$ для ансамбля элементов формируется следующим образом. Пусть на тело вращения действует поверхностная нагрузка p_r и p_z . Тогда вектор узловых нагрузок

$$\{f\}^e = \frac{2\pi l_{ij}}{6} \begin{pmatrix} (2R_i + R_j) p_r \\ (2R_i + R_j) p_z \\ (R_i + 2R_j) p_r \\ (R_i + 2R_j) p_z \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

где l_{ij} – длина стороны между узлами i и j .

Если рассматривается горизонтальная поверхность, то $R_i \neq R_j$ и тогда на наиболее удаленный от оси вращения узел будет приходиться большая часть нагрузки, чем на узел, расположенный ближе к оси вращения. Если рассматривается вертикальная поверхность, то $R_i = R_j$ и компоненты нагрузки поровну распределены между узлами конечного элемента.

Для получения разрешающей системы уравнений МКЭ проводится процесс ансамблирования конечных элементов по всей расчетной области и получается глобальная матрица жесткости и глобальный вектор нагрузки для всей области.

Система линейных алгебраических уравнений, получающаяся в результате применения процедуры МКЭ, симметрична, содержит 938 уравнений, имеет ленточную структуру (ширина ленты равна 40), решается методом Гаусса [3].

Реализация метода пошагового нагружения

Расчетная область, которая включает в себя контактирующие поверхности аварийного клапана, изображена на рис. 3.

На участках контура по нормали к поверхности действуют давления: $\sigma_{rn}|_{AB}=1000$ МПа; $\sigma_{zn}|_{BC}=200$ МПа; $\sigma_{zn}|_{FE}=-330$ МПа. Касательные напряжения на этих площадках принимаются равными нулю.

Перемещения на участках CG и GH равны нулю:

$$v|_{CG}=0, w|_{CG}=0, v|_{GH}=0, w|_{GH}=0.$$

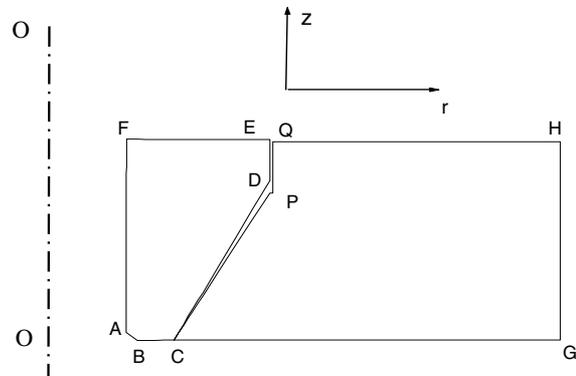


Рис. 3. Конфигурация расчетной области. Многоугольник ABCDEF – седло клапана, многоугольник CGHQP – основание клапана, линия OO – ось вращения

На рис. 3 угол конусности седла клапана равен 28° , угол конусности основания клапана равен 30° , и угол рассогласования составляет 2° .

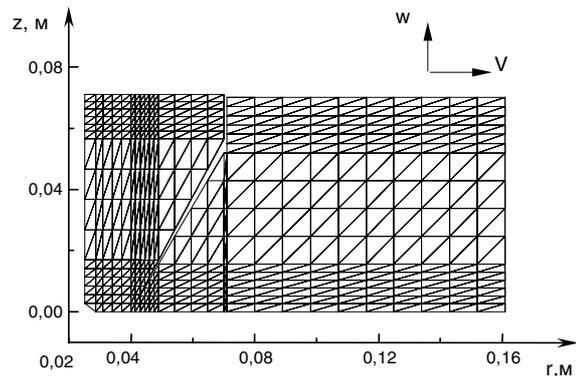


Рис. 4. Сетка конечных элементов

Седло клапана и основание клапана могут иметь различные углы конусности, поэтому сетка конечных элементов наносится независимо на седло клапана и на основание клапана (рис. 4).

Особый интерес представляет изменение сетки в зоне контакта седла клапана и основания клапана в процессе нагружения. Пусть в начальный момент нагружения (рис. 5) площадь контакта седла и основания клапана равна длине стороны одного элемента, умноженной на $2\pi l$. Тогда в начальный момент приложения нагрузки узлы 86 и 85, 105 и 104 связаны (совпадают), а узлы 123 и 124 находятся на некотором расстоянии друг от друга. По мере возрастания сжимающей нагрузки седло и основание клапана деформируются и узлы 123 и 124 постепенно приближаются и сливаются в один. После этого седло и клапан имеют общую площадку, расположенную между узлами 86-105-124 с одной стороны на седле и узлами 85-104-123 с другой стороны на основании клапана.

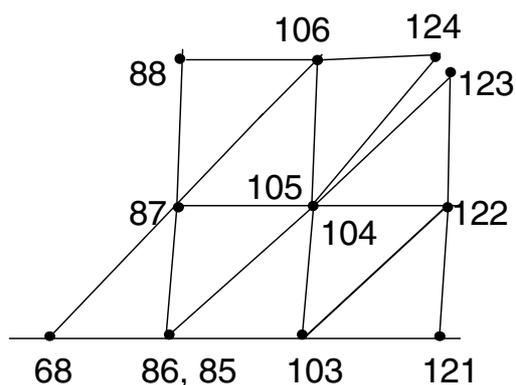


Рис. 5. Сетка конечных элементов в зоне контакта

Задача расчета клапана решается методом пошагового нагружения [4]. На каждом шаге процесса рассчитывается НДС седла и основания. Затем контролируется, насколько близко подходит узел на седле клапана (узел 124) к соответствующему узлу на основании клапана (узел 123). В процессе решения на каждом шаге происходит вычисление узлов деформированной сетки конечных элементов. Если расстояние между соседними узлами седла и основания клапана меньше наперед заданной малой величины, узлы связываются в один. Процесс нагружения может продолжаться дальше, однако площадь контакта на следующих шагах нагружения увеличивается по сравнению с начальной. Таким образом, площадь контакта седла и основания клапана по мере развития процесса нагру-

жения будет изменяться, что и учитывается в алгоритме последовательного нагружения.

Процедура связывания узлов состоит в следующем. Перемещения в связанных узлах равны, следовательно, строки и столбцы в глобальной матрице жесткости, соответствующие перемещениям связываемых узлов, не являются независимыми. Один из связываемых узлов принимается за основной, другой за вспомогательный, строки и столбцы вспомогательного узла складываются со строками и столбцами основного узла. Затем строки и столбцы вспомогательного узла преобразуются следующим образом: диагональный член умножается на 10^6 , а компоненты глобального вектора нагрузки, соответствующие вспомогательному узлу, приравниваются нулю.

После решения системы алгебраических уравнений получается, что перемещения во вспомогательном узле равны нулю. Приравнивая их перемещения в основном узле, получаем реальную картину перемещений в упругом теле.

Расчет напряженно-деформированного состояния аварийного клапана при различных углах конусности седла

Сначала рассчитывается НДС узла седло-основание клапана в случае, когда угол конусности седла и основания клапана совпадают и равны 30° . Поверхности и линии уровня интенсивности напряжений и деформаций в случае одинаковых углов конусности

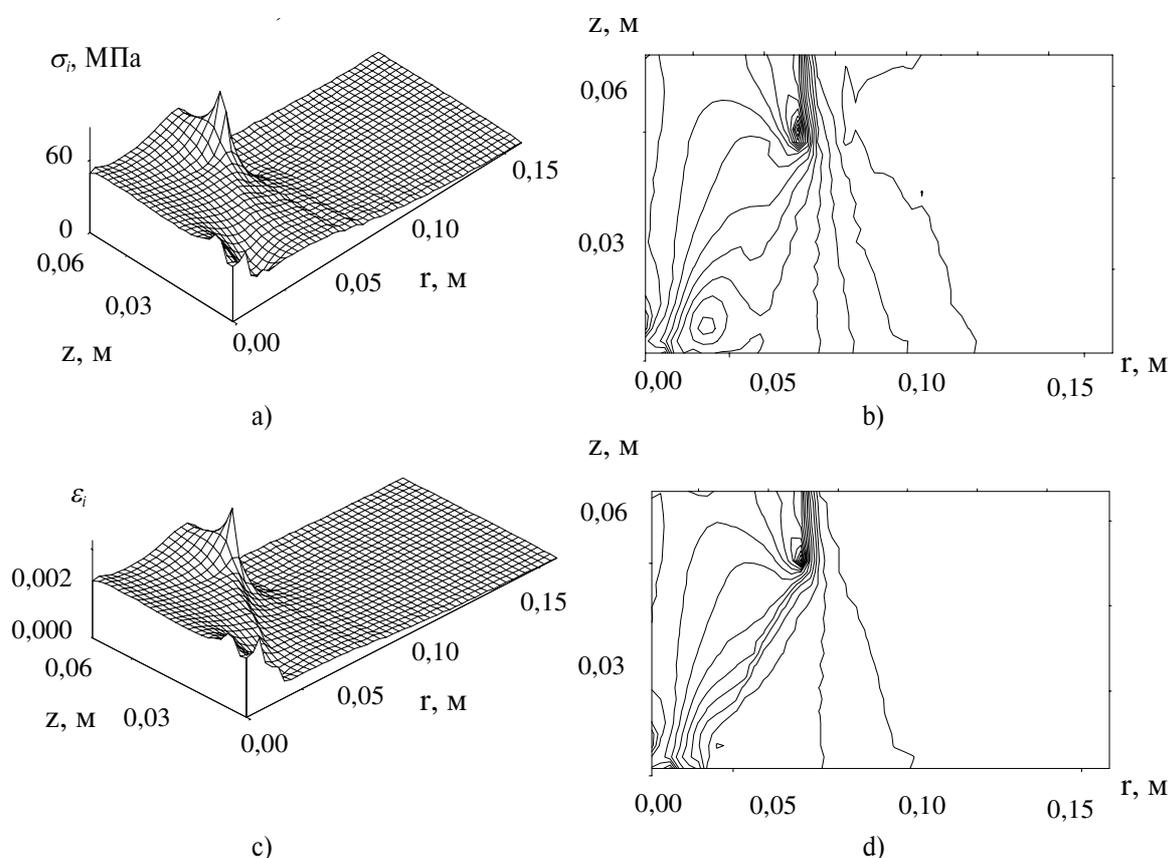


Рис. 6. Поверхности интенсивности напряжений σ_i (a) и интенсивности деформаций ϵ_i (c), линии уровня интенсивности напряжений (b) и линии уровня интенсивности деформаций (d). Углы конусности седла и основания клапана совпадают (30°)

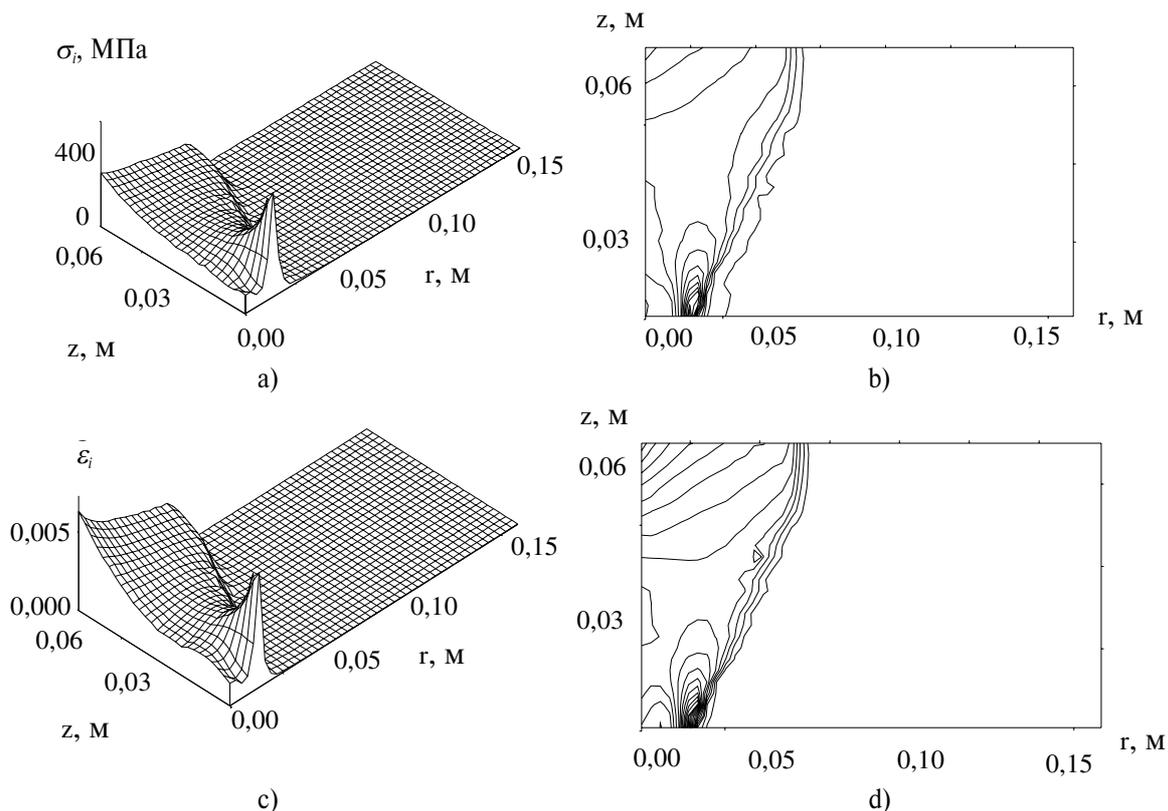


Рис. 7. Поверхности интенсивности напряжений σ_i (a) и интенсивности деформаций ϵ_i (c), линии уровня интенсивности напряжений (b) и линии уровня интенсивности деформаций (d). Углы конусности седла (28°) и основания клапана (30°) не совпадают

приведены на рис. 6. Параметры НДС клапана в случае, когда углы конусности седла (28°) и основания клапана (30°) не совпадают, приведены на рис. 7.

Следует отметить, что параметры НДС, рассчитанные для изменения углов конусности седла в пределах от 27° до 29° , отличаются незначительно.

На рис. 7 видна локализация параметров НДС на небольшом участке контактной поверхности при несовпадении углов конусности седла и основания клапана. Угол конусности седла клапана 28° обеспечивает на поверхности контакта седла и основания клапана уровень напряжений, сравнимый с уровнем напряжений на поверхности контакта седла и плунжера. Так как при этом уровне напряжений на контактной поверхности "седло-плунжер" обеспечивается герметизация, то и на поверхности "седло-основание клапана" обеспечивается герметичность соединения.

Таким образом, в конструкции аварийного клапана, в котором угол конусности седла клапана и основания отличаются на $1...3^\circ$, обеспечивается герметизация на поверхности "седло-основание клапана" за счет локализации сжимающих напря-

жений, сравнимых с напряжениями на контактной поверхности плунжер-седло клапана.

Выводы

1. В работе приведен пример численного решения осесимметричной контактной задачи теории упругости. Особенность постановки задачи и ее реализации заключается в том, что область контакта заранее неизвестна, а ее размеры определяются и уточняются в ходе решения. Разработанный алгоритм, основанный на использовании МКЭ в сочетании с процедурой пошагового приложения нагрузки, позволяет получить оценки параметров НДС в зоне контакта на каждом шаге нагружения и в окончательном рабочем состоянии.
2. Анализ НДС сопрягаемых элементов клапана в зоне контакта показывает, что изменение геометрии сопрягаемых элементов приводит к такому уровню напряжений в зоне контакта, что это сопряжение становится герметичным. В связи с этим предлагаемые упрощения в конструкции клапана являются вполне обоснованными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. Пер. с англ. — М.: Наука, 1975. — 576 с.
2. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. Пер. с англ. — М.: Мир, 1979. — 392 с.

3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975. — 541 с.
4. Хофмейстер Л., Гринбаум Г., Ивенсен Д. Упругопластический расчет больших деформаций методом конечных элементов // Ракетная техника и космонавтика. — 1971. — Т. 9. — № 7. — С. 42–51.