

**О РАЦИОНАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ
ДИСТАНЦИОННЫХ ПЛАНК НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
В АВТОКЛАВАХ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**

Описаны численные исследования влияния дистанционных планок нагревательных элементов различной формы на внутреннюю стенку автоклавов высокого давления. Исследования проведены методом конечных элементов. Даны рекомендации для оптимального выбора формы дистанционных планок при проектировании новых конструкций автоклавов.

Ключевые слова: напряжения, метод конечных элементов, численный анализ, дистанционные планки, автоклав, давление.

D.A. Elovenko
O.V. Repetskiy

**ON RATIONAL DESIGN OF DISTANCE PLATES
OF HEATING ELEMENTS IN HIGH-PRESSURE AUTOCLAVES**

The article gives an overview of studies on influence of distance plates in heating elements of various shapes on the inner wall of high-pressure autoclaves. The studies were carried out by the method of finite elements. The authors give recommendations concerning choosing the optimal shape of distance plates when designing new constructions of autoclaves.

Keywords: intensity, method of finite elements, numerical analysis, distance plates, autoclave, pressure.

В современных сборных конструкциях автоклавов высокого давления обеспечение прочности внутренней цилиндрической стенки, которая образует реакционное пространство и проводит тепло от нагревательных элементов [1; 4], является актуальной научно-технической задачей. Дистанционные планки и центральная стенка находятся в контактном взаимодействии. Относительно небольшая толщина и форма дистанционных планок нагревательных элементов оказывает весьма значительное влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) центральной стенки автоклава.

Когда дистанционные планки имеют прямоугольную форму поперечного сечения, то на границе контактной и свободной поверхности в зоне прямого угла планки на центральной стенке будет иметь место локальное повышение напряженного состояния и возможно появление недопустимых деформаций, приводящих к образованию трещины или разрушению центральной стенки.

Целью настоящей работы является попытка отразить степень негативного воздействия дистанционных планок прямоугольной формы сечения, а также предложение рациональной формы сечения дистанционных планок и исследование НДС центральной стенки при их использовании.

Для исследования НДС внутренней стенки автоклава на удалении от кольцевых сварных швов в первом приближении рассматриваем задачу в плоском виде, моделируя одно поперечное сечение цилиндрической части сосуда.

В цилиндрической стенке под действием внутреннего давления возникают кольцевые напряжения [2; 3]:

$$\sigma_h = \frac{qr}{s},$$

где q — внутреннее давление, МПа (50 МПа); r — внутренний радиус, мм (200 мм); s — толщина внутренней цилиндрической стенки, мм (10 мм).

Таким образом, чтобы использовать расчетную схему (рис. 1) как плоскую модель в прямоугольной системе координат, необходимо задать поправку на кольцевые напряжения в центральной обечайке путем нагружения внутренней стенки растягивающим давлением соответствующей величины σ_0 , которое определяется по формуле

$$\sigma_0 = \frac{q_0 r}{s},$$

где q_0 — перепад давления по толщине внутренней стенки, МПа (5 МПа); r — внутренний радиус, мм (200 мм); s — толщина внутренней цилиндрической стенки, мм (10 мм).

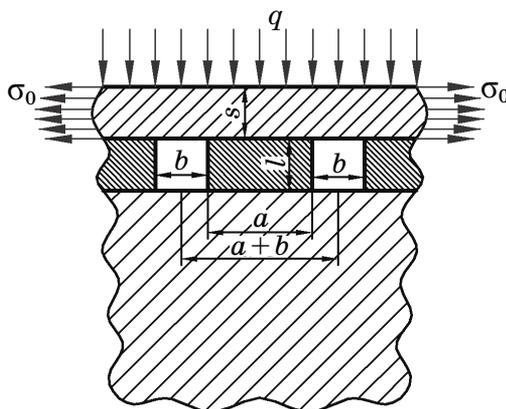


Рис. 1. Расчетная модель для исследования напряженного состояния центральной стенки автоклава толщиной S

Внутреннее давление q для исследований было взято равным 50 МПа. Материалы центральной стенки, планок и несущей стенки приняты одинаковыми с модулем упругости, равным $2 \cdot 10^5$ МПа, и коэффициентом Пуассона 0,3. Контактное взаимодействие деталей осуществляется без трения.

Анализ НДС произведен методом конечных элементов с помощью программного комплекса MSC.Marc [5; 6]. Ввиду того что НДС будет симметрично повторяться на интервале $0,5b+a+0,5b$, который является расстоянием между центрами свободных участков наружной поверхности центральной стенки (см. рис. 1), фиксируя напряжения на наружной и внутренней поверхности центральной стенки, получим графики НДС, представленные на рис. 2 и 3. Из графика на рис. 2 следует, что при контакте планок с внутренней стенкой, когда сопрягаемые элементы являются деформируемыми, имеет место локальное увеличение напряжений, обусловленное наличием прямых углов дистанционных планок.

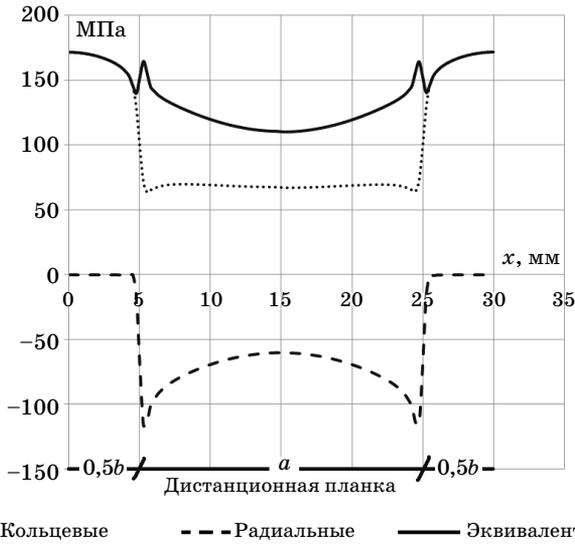


Рис. 2. Напряжения, возникающие на наружной поверхности центральной стенки автоклава под действием внутреннего давления 50 МПа, на промежутке $0,5b+a+0,5b$

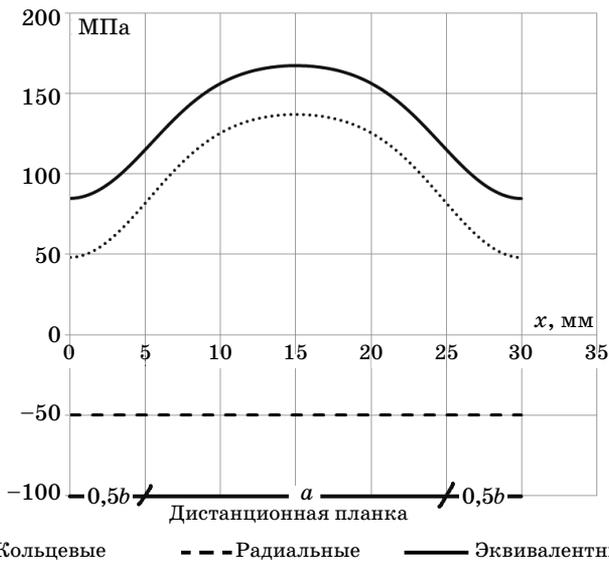


Рис. 3. Напряжения, возникающие на внутренней поверхности центральной стенки автоклава под действием внутреннего давления 50 МПа, на промежутке $0,5b+a+0,5b$

Учитывая, что между дистанционными планками располагаются нагревательные элементы круглого поперечного сечения, можно исследовать вышеописанную задачу для формы поперечного сечения планок, имеющих обратный радиус закругления, например равный $0,2l$. Такая форма имеет более податливую зону деформирования в области вершин планки, что может снизить локализацию напряжений на центральной стенке с одновременным увеличением контактной зоны, что снизит напряжения от прогиба стенки над нагревательными элементами. Расчет-

ная схема с новым профилем планок представлена на рис. 4. Все прочие параметры при моделировании и анализе остались неизменными.

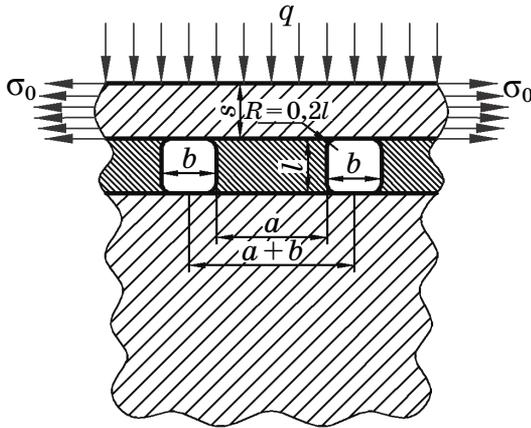


Рис. 4. Расчетная модель для исследования напряженного состояния центральной стенки автоклава толщиной S

Аналогично фиксируя напряжения на наружной и внутренней поверхности центральной стенки, получим графики НДС, представленные на рис. 4 и 5. Из графика результатов исследования на рис. 5 видно, что на наружной поверхности центральной стенки скачок радиальных напряжений снизился на 25%, кольцевых — на 9%, а график эквивалентных напряжений стал значительно более гладким, что отражает комплексное изменение НДС центральной стенки в благоприятную сторону.

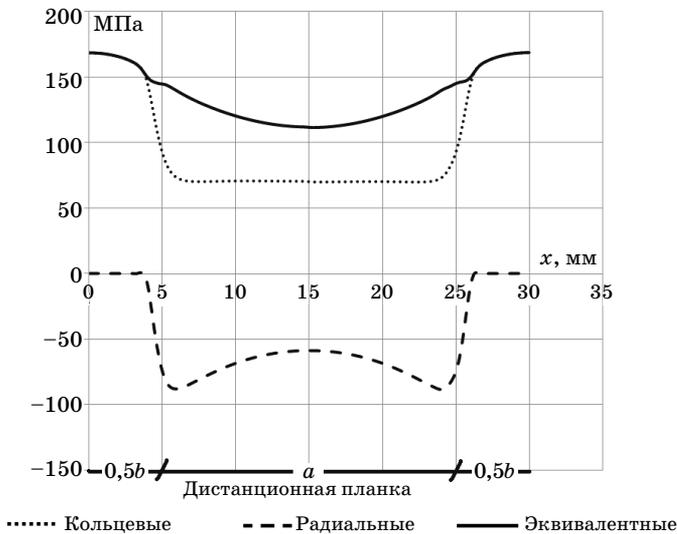


Рис. 5. Напряжения, возникающие на наружной поверхности центральной стенки автоклава под действием внутреннего давления 50 МПа, на промежутке $0,5b+a+0,5b$

Увеличивая радиус в 2 раза до $0,4l$ имеем новую расчетную схему, которая отличается от предыдущих только этим конструктивным элементом. Теперь свободная поверхность дистанционных планок близ-

ка к эквидистантной с цилиндрической поверхностью нагревательных элементов, а контактная поверхность — к максимально возможной величине. Исследуя такую конструкцию аналогичным образом, получим графики НДС на наружной и внутренней поверхности центральной стенки автоклава (рис. 7 и 8). Полученные результаты показывают, что на наружной поверхности центральной стенки скачок радиальных напряжений снизился на 33%, кольцевых — на 13,7%, а график эквивалентных напряжений стал еще более гладким, что отражает комплексное изменение НДС центральной стенки в лучшую сторону, если результаты сопоставить вариантом, когда $R = 0,2l$.

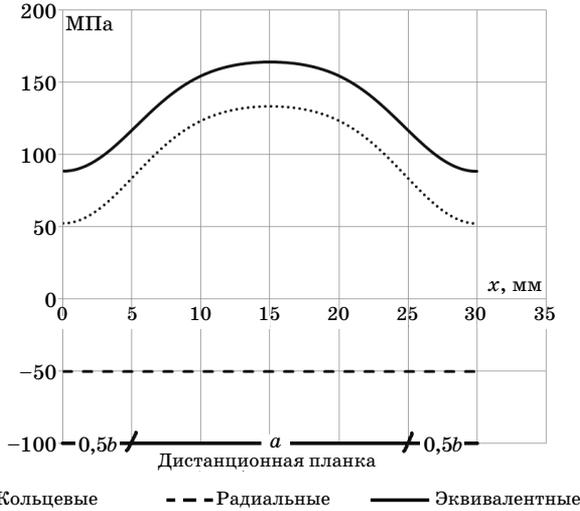


Рис. 6. Напряжения, возникающие на внутренней поверхности центральной стенки автоклава под действием внутреннего давления 50 МПа, на промежутке $0,5b+a+0,5b$

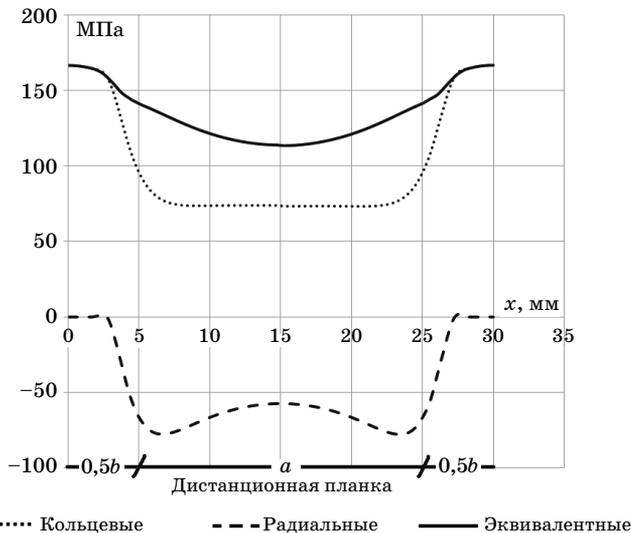


Рис. 7. Напряжения, возникающие на наружной поверхности центральной стенки автоклава под действием внутреннего давления 50 МПа, на промежутке $0,5b+a+0,5b$

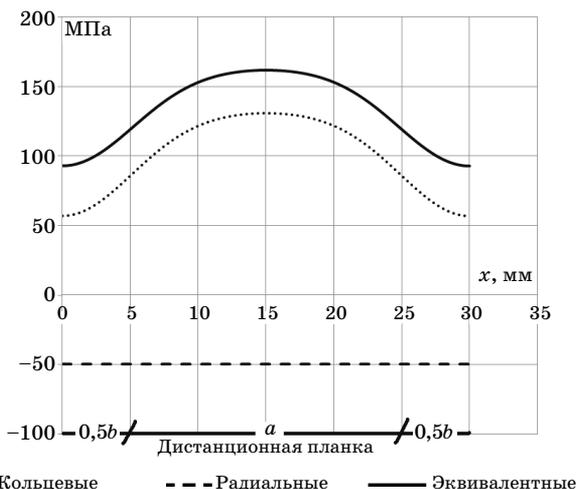


Рис. 8. Напряжения, возникающие на внутренней поверхности центральной стенки автоклава под действием внутреннего давления 50 МПа, на промежутке $0,5b+a+0,5b$

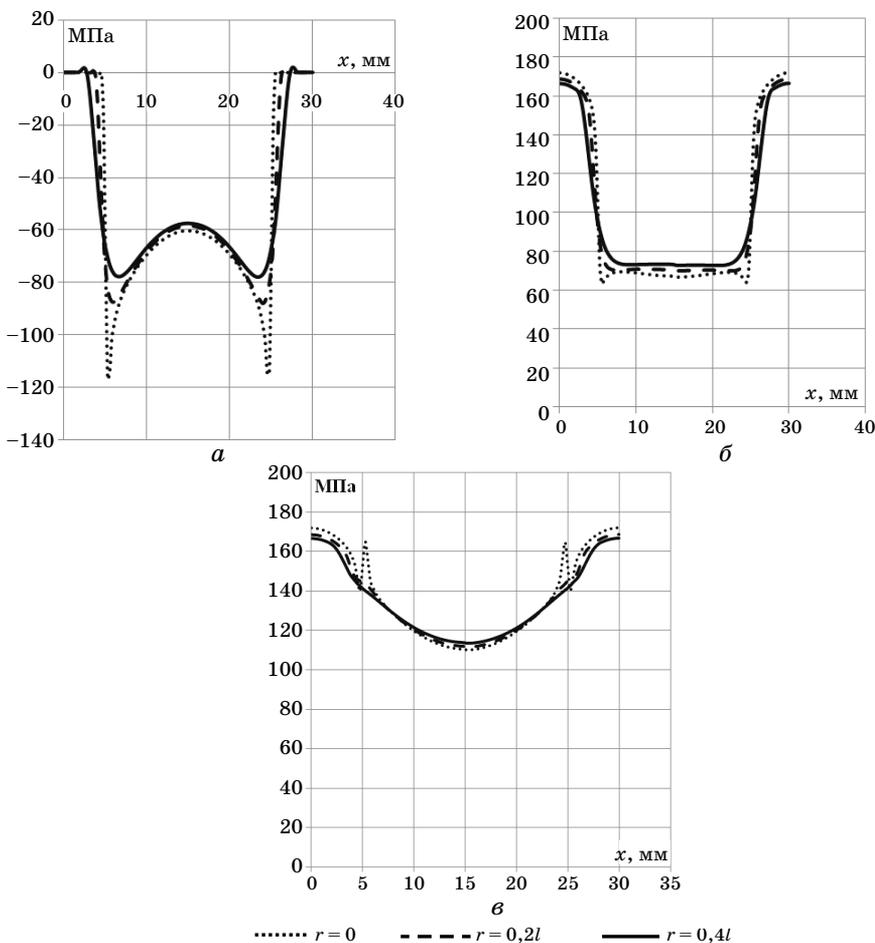


Рис. 9. Графики сравнения а — радиальных, б — кольцевых, в — эквивалентных напряжений в зависимости от радиуса r на промежутке $0,5b+a+0,5b$

Проведенные исследования показали, что применение дистанционных планок нагревательных элементов новой формы профиля в поперечном сечении значительно снижает локальные увеличения радиальных и кольцевых напряжений на наружной поверхности внутренней стенки автоклава (рис. 9, а и б), а также делает гладкой функцию эквивалентных напряжений на промежутке $0,5b+a+0,5b$.

Учитывая полученные в работе результаты, можно сделать вывод о том, что в процессе проектирования и на этапе изготовления новых конструкций стенок автоклавов высокого давления форму дистанционных планок необходимо выполнять с обратным радиусом R . Величину этого радиуса следует делать таким, чтобы свободные поверхности дистанционных планок были как можно более близки к эквидистантной поверхности цилиндрического нагревательного элемента и имели бы с ним при этом минимально возможный зазор.

Список использованной литературы

1. Еловенко Д.А. Экспериментальное исследование модели автоклава для гидротермального синтеза минералов / Д.А. Еловенко, П.Г. Пимштейн, О.В. Репецкий, Д.В. Татаринов // Вестник Байкальского союза стипендиатов DAAD. — 2010. — № 1 (7). — С. 11–19.
2. Контарович З.Б. Основы расчета химических машин и аппаратов / З.Б. Контарович. — М., МАШГИЗ., 1960. — 744 с.
3. Никольс Р.В. Конструирование и технология изготовления сосудов давления: пер. с англ. / Р.В. Никольс. — М.: Машиностроение, 1975. — 464 с.
4. Хайманн Б. Мехатроника: Компоненты, методы, примеры / Б. Хайманн, В. Герт, К. Попп, О. Репецкий; под ред. О.В. Репецкого; пер. с нем. А.В. Хапров [и др.]. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. — 602 с.
5. MSC.Marc 2010. User's Guide. MSC.Software Corporation, 2010. — 1946 p.
6. MSC.Marc 2010. Vol. A: Theory and User Information. MSC.Software Corporation, 2010. — 830 p.

Referenses

1. Elovenko D.A. Eksperimental'noe issledovanie modeli avtoklava dlya gidrotermalnogo sinteza mineralov / D.A. Elovenko, P.G. Pimshtein, O.V. Repetskii, D.V. Tatarinov // Vestnik Baikal'skogo soyuza stipendiatov DAAD. — 2010. — № 1 (7). — S. 11–19.
2. Kontarovich Z.B. Osnovy rascheta khimicheskikh mashin i apparatov / Z.B. Kontarovich. — M., MASHGIZ., 1960. — 744 s.
3. Nikol's R.V. Konstruirovaniye i tekhnologiya izgotovleniya sudov davleniya: per. s angl. / R.V. Nikol's. — M.: Mashinostroeniye, 1975. — 464 s.
4. Khaimann B. Mekhatronika: Komponenty, metody, primery / B. Khaimann, V. Gert, K. Popp, O. Repetskii; pod red. O.V. Repetskogo; per. s nem. A.V. Khaprov [i dr.]. — Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2010. — 602 s.
5. MSC.Marc 2010. User's Guide. MSC.Software Corporation, 2010. — 1946 p.
6. MSC.Marc 2010. Vol. A: Theory and User Information. MSC.Software Corporation, 2010. — 830 p.

Информация об авторах

Еловенко Денис Александрович — аспирант, кафедра информатики и кибернетики, Байкальский государственный университет экономики и права, г. Иркутск, e-mail: bear-paw3@yandex.ru.

Репецкий Олег Владимирович — доктор технических наук, профессор, проректор по международной деятельности, Байкальский государственный университет экономики и права, г. Иркутск, e-mail: repetskii@isea.ru.

Authors

Elovenko Denis Alexandrovich — post-graduate student, Chair of Computer Science and Cybernetics, Baikal State University of Economics and Law, Irkutsk, e-mail: bear-paw3@yandex.ru.

Repetskii Oleg Vladimirovich — Doctor of Science in Engineering, Professor, Vice Rector for International Relations, Baikal State University of Economics and Law, Irkutsk, e-mail: repetskii@isea.ru.