

УДК 004.94  
ББК 32.816

Д.А. Еловенко  
О.В. Репецкий

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СТЕНКИ СО ВСТРОЕННЫМИ  
НАГРЕВАТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ  
И ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫМ МАТЕРИАЛОМ  
В АВТОКЛАВЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ  
И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ЕЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ**

Описаны математическая модель и методика расчета цилиндрической стенки автоклава высокого давления. Определены оптимальные характеристики ее технологичности и работоспособной конструкции.

*Ключевые слова:* перемещение, контактное давление, модуль упругости, напряжения, тепловое поле.

D.A. Elovenko  
O.V. Repetskiy

**MATHEMATICAL MODELING OF STRESS-STRAIN STATE  
OF CYLINDRICAL WALL WITH EMBEDDED HEATING ELEMENTS  
AND HEAT-INSULATION MATERIAL  
IN HIGH-PRESSURE AUTOCLAVES AND ANALYSIS  
OF ITS WORKING ABILITY PARAMETERS**

The authors describe the mathematical model and calculation method of cylindrical wall of high-pressure autoclave, and determine the optimal characteristics of its technological effectiveness and workable construction.

*Keywords:* displacement, contact pressure, Young's modulus, stress, heat field.

Большинство конструкций автоклавов высокого давления имеют внутренний обогрев. Их общим недостатком является присутствие нагревательных элементов непосредственно в реакционном пространстве, что значительно снижает полезный объем реакционного пространства и приводит к быстрому выходу из рабочего состояния нагревательных элементов. Вторым, крайне негативным, обстоятельством является нежелательный перегрев несущей стенки автоклава, что снижает ее прочностные характеристики и, как следствие, приводит к уменьшению единичной мощности СВД в целом.

Конструкция цилиндрической стенки, представленная на рис. 1 не имеет описанных выше недостатков. Если ее несущая часть 5 имеет многослойное исполнение, то этот элемент может быть рассчитан по [8], в противном случае ее расчет осуществляется с помощью известных аналитических решений [11; 12]. Центральная стенка 1, является высоко-

нагруженным элементом и имеет сложное НДС на которое прямо влияет слой с нагревательными элементами 2, а именно форма и расположение дистанционных планок [4; 7]. Слой, расположенный за нагревательными элементами 3, должен иметь оптимальную толщину, которая может быть определена из результатов исследований [2; 3]. Толщина и материал теплоизоляционного слоя определяются его теплофизическими свойствами [5], который должен устранить снижение механических характеристик несущей стенки 5 из-за ее нежелательного перегрева в процессе работы автоклава.

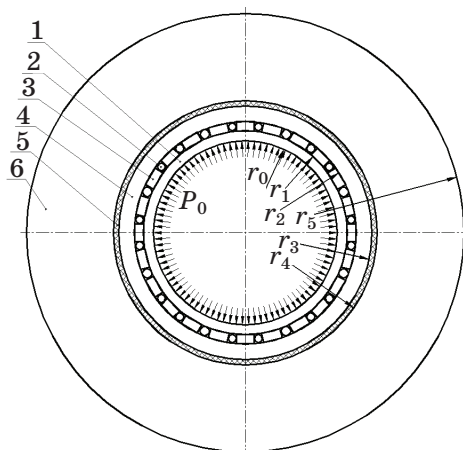


Рис. 1. Конструктивная схема цилиндрической стенки автоклава высокого давления

Сборная конструкция цилиндрической стенки автоклава (см. рис. 1), должна работать упруго. Основным критерием такой работы является выполнение условий совместности деформаций ее контактных поверхностей

$$\begin{cases} u_1(r_1) = u_2(r_1) \\ u_2(r_2) = u_3(r_2) \\ u_3(r_3) = u_4(r_3) \\ u_4(r_4) = u_5(r_4) \end{cases},$$

которое при нагружении конструкции (см. рис. 1) внутренним давлением  $P_0$  имеет общий вид

$$\begin{cases} \frac{r_1}{E_1} (\sigma_t^1(P_0) - \mu (\sigma_r^1(P_0) + \sigma_z^1(P_0))) = \frac{r_1}{E_2} (\sigma_t^2(P_0) - \mu (\sigma_r^2(P_0) + \sigma_z^2(P_0))) \\ \frac{r_2}{E_2} (\sigma_t^2(P_0) - \mu (\sigma_r^2(P_0) + \sigma_z^2(P_0))) = \frac{r_2}{E_3} (\sigma_t^3(P_0) - \mu (\sigma_r^3(P_0) + \sigma_z^3(P_0))) \\ \frac{r_3}{E_3} (\sigma_t^3(P_0) - \mu (\sigma_r^3(P_0) + \sigma_z^3(P_0))) = \frac{r_3}{E_4} (\sigma_t^4(P_0) - \mu (\sigma_r^4(P_0) + \sigma_z^4(P_0))) \\ \frac{r_4}{E_4} (\sigma_t^4(P_0) - \mu (\sigma_r^4(P_0) + \sigma_z^4(P_0))) = \frac{r_4}{E_5} (\sigma_t^5(P_0) - \mu (\sigma_r^5(P_0) + \sigma_z^5(P_0))) \end{cases},$$

и явный вид для конструкции (см. рис. 1), относительно контактных давлений

$$\left\{ \begin{aligned} & P_1 \left( (\mu + \mu^2) \left( \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right) - \frac{(1 - \mu^2)(r_1^2 + r_0^2)}{E_1(r_1^2 - r_0^2)} - \frac{(1 - \mu^2)(r_2^2 + r_1^2)}{E_2(r_2^2 - r_1^2)} \right) + P_2 \left( \frac{(1 - \mu^2)2\beta_2^2}{E_2(\beta_2^2 - 1)} \right) = \\ & = -P_0 \left( \frac{(1 - \mu^2)2}{E_1(\beta_1^2 - 1)} \right) \\ & P_1 \left( \frac{(1 - \mu^2)2}{E_2(\beta_2^2 - 1)} \right) + P_2 \left( (\mu + \mu^2) \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_3} \right) - \frac{(1 - \mu^2)(r_2^2 + r_1^2)}{E_2(r_2^2 - r_1^2)} - \frac{(1 - \mu^2)(r_3^2 + r_2^2)}{E_3(r_3^2 - r_2^2)} \right) + \\ & + P_3 \left( \frac{(1 - \mu^2)2\beta_3^2}{E_3(\beta_3^2 - 1)} \right) = 0 \\ & P_2 \left( \frac{(1 - \mu^2)2}{E_3(\beta_3^2 - 1)} \right) + P_3 \left( (\mu + \mu^2) \left( \frac{1}{E_3} - \frac{1}{E_4} \right) - \frac{(1 - \mu^2)(r_3^2 + r_2^2)}{E_3(r_3^2 - r_2^2)} - \frac{(1 - \mu^2)(r_4^2 + r_3^2)}{E_4(r_4^2 - r_3^2)} \right) + \\ & + P_4 \left( \frac{(1 - \mu^2)2\beta_4^2}{E_4(\beta_4^2 - 1)} \right) = 0 \\ & P_3 \left( \frac{(1 - \mu^2)2}{E_4(\beta_4^2 - 1)} \right) + P_4 \left( (\mu + \mu^2) \left( \frac{1}{E_4} - \frac{1}{E_5} \right) - \frac{(1 - \mu^2)(r_4^2 + r_3^2)}{E_4(r_4^2 - r_3^2)} - \frac{(1 - \mu^2)(r_5^2 + r_4^2)}{E_5(r_5^2 - r_4^2)} \right) = 0 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Модуль упругости слоя, представленного нагревательными элементами 2, может быть подобран, при использовании методики, описанной в [6]. Таким образом, для конструкции (см. рис. 1), интегральное условие равновесия имеет вид

$$\int_{r_0}^{r_1} \sigma_t^1(P_0) dr + \int_{r_2}^{r_3} \sigma_t^3(P_0) dr + \int_{r_4}^{r_5} \sigma_t^5(P_0) dr = P_0 r_0,$$

интегрируя которое, с учетом формул Ламе, получим систему

$$\begin{cases} P_1 r_1 = P_2 r_2 \\ P_3 r_3 = P_4 r_4 \end{cases}.$$

Добавляя к этой системе условия для перемещения контактных поверхностей, получим систему уравнений относительно контактных давлений

$$\left\{ \begin{aligned} & P_1 r_1 - P_2 r_2 = 0 \\ & \frac{r_1}{E_1} \left( \frac{P_0}{\beta_1^2 - 1} (1 + \frac{r_1^2}{r_1^2}) + \left( -\frac{P_1 \beta_1^2}{\beta_1^2 - 1} (1 + \frac{r_0^2}{r_1^2}) \right) - \mu \left( \frac{P_0}{\beta^2 - 1} \right) - \mu(-P_1) \right) = \\ & = \frac{r_2}{E_3} \left( \frac{P_2}{\beta_3^2 - 1} (1 + \frac{r_3^2}{r_2^2}) + \left( -\frac{P_3 \beta_3^2}{\beta_3^2 - 1} (1 + \frac{r_2^2}{r_2^2}) \right) - \mu \left( \frac{P_0}{\beta^2 - 1} \right) - \mu(-P_2) \right) + \\ & + \left( \frac{(P_1 + P_2)}{2} + \mu \left( \frac{P_0}{\beta^2 - 1} \right) \right) \frac{(r_2 - r_1)}{E_2} \\ & \frac{r_3}{E_3} \left( \frac{P_2}{\beta_3^2 - 1} (1 + \frac{r_3^2}{r_3^2}) + \left( -\frac{P_3 \beta_3^2}{\beta_3^2 - 1} (1 + \frac{r_2^2}{r_3^2}) \right) - \mu \left( \frac{P_0}{\beta^2 - 1} \right) - \mu(-P_3) \right) = \\ & = \frac{r_4}{E_5} \left( \frac{P_4}{\beta_5^2 - 1} (1 + \frac{r_5^2}{r_4^2}) - \mu \left( \frac{P_0}{\beta^2 - 1} \right) - \mu(-P_4) \right) + \left( \frac{(P_3 + P_4)}{2} + \mu \left( \frac{P_0}{\beta^2 - 1} \right) \right) \frac{(r_4 - r_3)}{E_4} \\ & P_3 r_3 - P_4 r_4 = 0 \end{aligned} \right. .$$

Полагая, что все слои стенки (см. рис. 1), имеют одинаковый модуль упругости, получим систему уравнений для определения контактных давлений  $P_1, P_2, P_3, P_4$  с учетом геометрических особенностей конструкции стенки и без использования модуля упругости слоев

$$\begin{cases} P_1 r_1 - P_2 r_2 = 0 \\ P_1 \left( r_1 \left( \mu - \frac{(r_1^2 + r_0^2)}{(r_1^2 - r_0^2)} \right) - \frac{(r_2 - r_1)}{2} \right) - P_2 \left( r_2 \left( \mu + \frac{(r_3^2 + r_2^2)}{(r_3^2 - r_2^2)} \right) + \frac{(r_2 - r_1)}{2} \right) + P_3 \left( \frac{2r_2 \beta_3^2}{(\beta_3^2 - 1)} \right) = \\ = P_0 \left( \frac{\mu(r_1 - r_2)}{\beta^2 - 1} - \frac{2r_1}{(\beta_1^2 - 1)} + \frac{\mu(r_2 - r_1)}{\beta^2 - 1} \right) \\ P_2 \left( \frac{2r_3}{(\beta_3^2 - 1)} \right) + P_3 \left( r_3 \left( \mu - \frac{(r_3^2 + r_2^2)}{(r_3^2 - r_2^2)} \right) - \frac{(r_4 - r_3)}{2} \right) - P_4 \left( r_4 \left( \mu + \frac{(r_5^2 + r_4^2)}{(r_5^2 - r_4^2)} \right) - \frac{(r_4 - r_3)}{2} \right) = \\ = P_0 \left( \frac{\mu(r_3 - r_4)}{\beta^2 - 1} + \frac{\mu(r_4 - r_3)}{\beta^2 - 1} \right) \\ P_3 r_3 - P_4 r_4 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

С помощью систем уравнений (1) и (2) можно подобрать модуль упругости слоя, образованного нагревательными элементами. Стоит отметить, что подбор модуля упругости  $E_2$  в системе уравнений (1) следует делать после изменения модуля упругости  $E_4$  на реальное значение модуля упругости теплоизоляционного материала 4. После этого определяются действительные значения контактных давлений, которые возникают в конструкции (см. рис. 1) от действия внутреннего давления  $P_0$ .

В ходе экспериментальных исследований опытной конструкции автоклава [9], было установлено, что максимальная температура нагрева в стенке имеет место на внутренней поверхности слоя 3 (см. рис. 1), который расположен за нагревательными элементами. Такую же температуру нагрева  $T_0$  имеют первые два слоя стенки, которые можно считать равномерно нагретыми и не имеющими температурного перепада между внутренними и наружными поверхностями.

Для обеспечения упругой работы цилиндрической стенки в рабочем режиме, необходимо надежное сжатие теплоизоляционного слоя, который будет гарантированно передавать радиальные нагрузки несущей стенке. В противном случае возможна недопустимая перегрузка центральной стенки и ее выход из строя. Решением этой проблемы может быть использование металла для центральной стенки, коэффициент теплового расширения которого  $\alpha_1$  будет больше, чем у остальных металлических компонентов конструкции, которые будут одинаковыми  $\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_5$ . Коэффициент теплового расширения теплоизоляционных материалов, которые были испытаны в предыдущей главе, ничтожно мал и его значением справедливо будет пренебречь  $\alpha_4 = 0$ . Учитывая также, что радиальные напряжений на внутренней и наружной поверхностях сплошной цилиндрической стенки, по толщине которой есть температурный перепад, равны нулю [1; 10], можем записать систему (1), с учетом сделанных замечаний

$$\begin{aligned}
 & P_1 \left( (\mu + \mu^2) \left( \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right) - \frac{(1 - \mu^2)(r_1^2 + r_0^2)}{E_1(r_1^2 - r_0^2)} - \frac{(1 - \mu^2)(r_2^2 + r_1^2)}{E_2(r_2^2 - r_1^2)} \right) + P_2 \left( \frac{(1 - \mu^2)2\beta_2^2}{E_2(\beta_2^2 - 1)} \right) = \\
 & = -P_0 \left( \frac{(1 - \mu^2)2}{E_1(\beta_1^2 - 1)} \right) + (\alpha_2 - \alpha_1)T_0 \\
 & P_1 \left( \frac{(1 - \mu^2)2}{E_2(\beta_2^2 - 1)} \right) + P_2 \left( (\mu + \mu^2) \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_3} \right) - \frac{(1 - \mu^2)(r_2^2 + r_1^2)}{E_2(r_2^2 - r_1^2)} - \frac{(1 - \mu^2)(r_3^2 + r_2^2)}{E_3(r_3^2 - r_2^2)} \right) + \\
 & + P_3 \left( \frac{(1 - \mu^2)2\beta_3^2}{E_3(\beta_3^2 - 1)} \right) = \frac{\alpha_3(1 + \mu)(T_0 - T(r_3))}{2} \left[ \frac{1}{\ln \left( \frac{r_3}{r_2} \right)} - \frac{2 \left( \frac{r_3}{r_0} \right)^2}{\left( \frac{r_3}{r_0} \right)^2 - \left( \frac{r_2}{r_0} \right)^2} \right] \\
 & P_2 \left( \frac{(1 - \mu^2)2}{E_3(\beta_3^2 - 1)} \right) + P_3 \left( (\mu + \mu^2) \left( \frac{1}{E_3} - \frac{1}{E_4} \right) - \frac{(1 - \mu^2)(r_3^2 + r_2^2)}{E_3(r_3^2 - r_2^2)} - \frac{(1 - \mu^2)(r_4^2 + r_3^2)}{E_4(r_4^2 - r_3^2)} \right) + \dots (3) \\
 & + P_4 \left( \frac{(1 - \mu^2)2\beta_4^2}{E_4(\beta_4^2 - 1)} \right) = -\alpha_3 T_0 - \frac{\alpha_3(1 + \mu)(T_0 - T(r_3))}{2} \left[ \frac{1}{\ln \left( \frac{r_3}{r_2} \right)} - \frac{2 \left( \frac{r_2}{r_0} \right)^2}{\left( \frac{r_3}{r_0} \right)^2 - \left( \frac{r_2}{r_0} \right)^2} \right] \\
 & P_3 \left( \frac{(1 - \mu^2)2}{E_4(\beta_4^2 - 1)} \right) + P_4 \left( (\mu + \mu^2) \left( \frac{1}{E_4} - \frac{1}{E_5} \right) - \frac{(1 - \mu^2)(r_4^2 + r_3^2)}{E_4(r_4^2 - r_3^2)} - \frac{(1 - \mu^2)(r_5^2 + r_4^2)}{E_5(r_5^2 - r_4^2)} \right) = \\
 & = \alpha_5 T(r_4) + \frac{\alpha_5(1 + \mu)(T(r_4) - T(r_5))}{2} \left[ \frac{1}{\ln \left( \frac{r_5}{r_4} \right)} - \frac{2 \left( \frac{r_5}{r_0} \right)^2}{\left( \frac{r_5}{r_0} \right)^2 - \left( \frac{r_4}{r_0} \right)^2} \right]
 \end{aligned}$$

Стоит отметить, что линейное расширение элемента 3 в конструкции (см. рис. 1) от воздействия высоких тепловых нагрузок, которые неизбежно возникнут из-за присутствия теплоизоляционного слоя 4, выполняющего свою функцию, будет достаточным для обеспечения надежного сжатия теплоизоляционного материала 4, которое требуется технологическими условиями работы сборной конструкции стенки автоклава. Следовательно, необходимость использования коэффициентом теплового расширения стенки 1, отличного от других компонентов конструкции, в данном случае становится не актуальной.

Тепловое поле, возникающее в сборной цилиндрической стенке автоклава (см. рис. 1) от нагревательных элементов, является осесимметричным, а тепловой поток будет стационарным по толщине стенки от нагревательных элементов к наружной поверхности сосуда. Он может быть найден как

$$q_l = \frac{2\pi(T_0 - T_{cp})}{\frac{1}{\lambda_3} \ln \left( \frac{r_3}{r_2} \right) + \frac{1}{\lambda_4} \ln \left( \frac{r_4}{r_3} \right) + \frac{1}{\lambda_5} \ln \left( \frac{r_5}{r_4} \right) + \frac{1}{K_{cp} r_5}},$$

тогда неизвестные значения температур на контактных радиусах в системе (3) найдем из уравнений

$$T(r_3) = T_0 - \frac{q_l}{2\pi \lambda_3} \ln \left( \frac{r_3}{r_2} \right),$$

$$T(r_4) = T(r_3) - \frac{q_l}{2\pi \lambda_4} \ln \left( \frac{r_4}{r_3} \right),$$

$$T(r_5) = T(r_4) - \frac{q_l}{2\pi \lambda_5} \ln \left( \frac{r_5}{r_4} \right).$$

Сборная цилиндрическая стенка автоклава высокого давления (см. рис. 1) будет работать в безопасном режиме, когда эквивалентные напряжения на внутренней поверхности центральной стенки 1, имеющие наибольшее значение в конструкции не будут превышать значения допускаемых напряжений, определенные для металла, выбираемого при проектировании сосуда на заданные технологические параметры. Это возможно при условии, что материалы всех конструктивных элементов, кроме теплоизоляции, будут иметь одинаковый коэффициент теплового расширения.

Условие прочности конструкции (см. рис. 1) в этом случае имеет вид

$$\sigma_{\text{эке}}(r_0) \leq [\sigma]_1,$$

Эквивалентные напряжения на внутренней поверхности цилиндрической стенки 1 по четвертой теории прочности имеют вид

$$\sigma_{\text{эке}}(r_0) =$$

$$= \sqrt{\frac{(\sigma_t^{r_0}(P_0, T_0) - \sigma_z^{r_0}(P_0, T_0))^2 + (\sigma_t^{r_0}(P_0, T_0) + \sigma_r^{r_0}(P_0, T_0))^2 + (\sigma_z^{r_0}(P_0, T_0) + \sigma_r^{r_0}(P_0, T_0))^2}{2}},$$

а допускаемые напряжения при выборе материала конструктивного элемента 1 определяются величиной давления, которое должен выдержать компонент сборной конструкции стенки

$$[\sigma]_1 = \frac{P_0}{\beta_1}.$$

Учитывая результаты расчета модуля упругости для теплоизоляции из шамотного порошка — 21 738 МПа при упругой работе под технологической нагрузкой и асбеста — 19 833 МПа соответственно, а также результаты исследований [5], которые показывают, что коэффициент теплопроводности этих материалов находится в пределах 0,77–1,411 °С, можем построить графические зависимости работоспособных конструкций. Выбирая геометрические параметры и свойства материалов, стоит отметить, что основное влияние на НДС стенки 1 окажет толщина и свойства теплоизоляции, модуль упругости которой можем положить равным 20 000 МПа.

Графические зависимости внутреннего давления, от температуры нагревательных элементов для коэффициентов теплопроводности теплоизоляционного материала в конструкции:  $r_0 = 195$ ;  $r_1 = 210$ ;  $r_2 = 220$ ;  $r_3 = 250$ ;  $r_4 = 255$ ;  $r_5 = 480$  мм;  $E_1 = 200\,000$ ;  $E_2 = 33\,333,3$ ;  $E_3 = 200\,000$ ;  $E_4 = 20\,000$ ;  $E_5 = 200\,000$  МПа представлены на рис. 2. На рис. 3 показан аналогичный график для конструкции:  $r_0 = 400$ ;  $r_1 = 410$ ;  $r_2 = 452$ ;  $r_3 = 470$ ;  $r_4 = 485$ ;  $r_5 = 800$  мм;  $E_1 = 200\,000$ ;  $E_2 = 40\,000$ ;  $E_3 = 200\,000$ ;  $E_4 = 20\,000$ ;  $E_5 = 200\,000$  МПа.

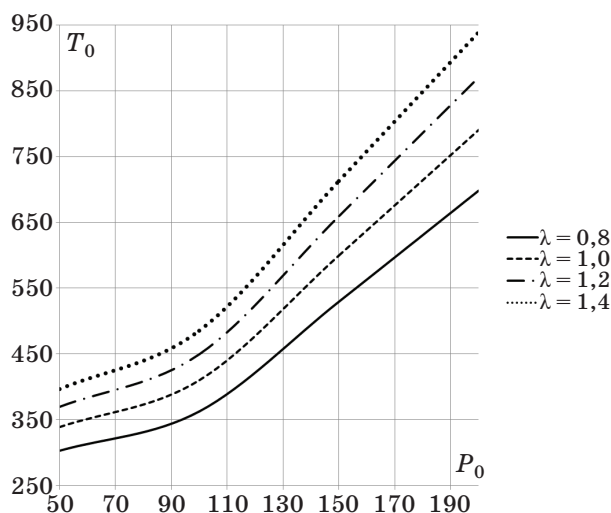


Рис. 2. График для определения материала центральной стенки обечайки автоклава и теплоизоляции

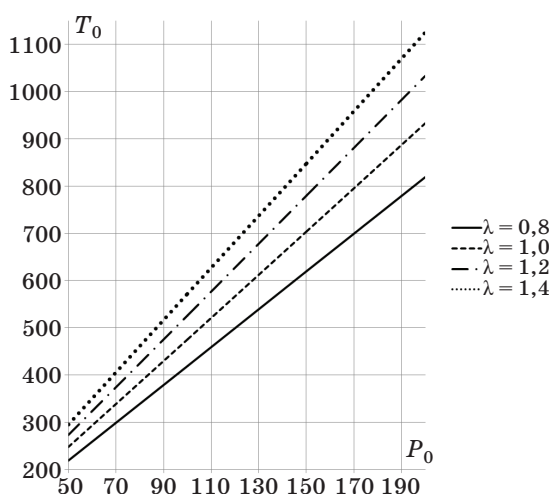


Рис. 3. График для определения материала центральной стенки обечайки автоклава и теплоизоляции

### Список использованной литературы

1. Биргер И.А. Прочность, устойчивость, колебания: справ.: в 3 т. / И.А. Биргер. — М.: Машиностроение. 1968.
2. Еловенко Д.А. Анализ влияния дистанционных планок нагревательных элементов на неравномерность напряженного состояния несущей стенки сосуда высокого давления методом конечных элементов на базе программного комплекса MSC.MARC / Д.А. Еловенко, П.Г. Пимштейн, О.В. Репецкий // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. — Иркутск: ИИТМ ИрГУПС, 2011. — С. 79–83.
3. Еловенко Д.А. Анализ напряженного состояния упругой полуплоскости, нагруженной постоянным давлением на ограниченных промежуточных участках с заданным периодом методом конечных элементов на базе программного комплекса MSC.MARC / Д.А. Еловенко, О.В. Репецкий // Известия Иркутской государственной экономической академии. — 2011. — № 5. — С. 171–175.



4. Еловенко Д.А. Исследование влияния дистанционных планок нагревательных элементов и их конструктивных параметров на напряженное состояние центральной стенки в новых конструкциях автоклавов высокого давления / Д.А. Еловенко, О.В. Репецкий // Вестник стипендиатов ДААД. — 2011. — № 1 (8). — С. 25–27.

5. Еловенко Д.А. Исследование теплофизических характеристик теплоизоляционных материалов для новых конструкций цилиндрических стенок автоклавов высокого давления / Д.А. Еловенко, О.В. Репецкий // Известия Иркутской государственной экономической академии. — 2011. — № 6. — С. 201–206.

6. Еловенко Д.А. К вопросу о расчете цилиндрических стенок со встроенными нагревательными элементами в автоклавах высокого давления / Д.А. Еловенко, О.В. Репецкий // Известия Иркутской государственной экономической академии (Байкальский государственный университет экономики и права) (электронный журнал). 2012. № 1. URL: <http://eizvestia.isea.ru/reader/article.aspx?id=11860>. (Идентификац. номер статьи в НТЦ «Информрегистр» 0421200101\0050).

7. Еловенко Д.А. О рациональном проектировании дистанционных планок нагревательных элементов в автоклавах высокого давления / Д.А. Еловенко, О.В. Репецкий // Известия Иркутской государственной экономической академии (Байкальский государственный университет экономики и права) (электронный журнал). 2011. № 5. URL: <http://eizvestia.isea.ru/reader/article.aspx?id=9724>. (Идентификац. номер статьи в НТЦ «Информрегистр» 0421100101\0260).

8. Еловенко Д.А. Разработка программы для расчета температурных полей и напряжений в многослойной стенке сосуда высокого давления / Д.А. Еловенко // Применение математических методов и информационных технологий в экономике: сб. науч. тр. — Иркутск: Изд-во БГУЭП, 2011. — С. 40–45.

9. Еловенко Д.А. Экспериментальное исследование модели автоклава для гидротермального синтеза минералов / Д.А. Еловенко, П.Г. Пимштейн, О.В. Репецкий, Д.В. Татаринов // Вестник стипендиатов ДААД. — 2010. — № 1 (7). — С. 11–19.

10. Ковалено А.Д. Основы термоупругости / А.Д. Ковалено. — Киев: Наукова думка, 1970. — 308 с.

11. Конторович З.Б. Основы расчета химических машин и аппаратов / З.Б. Конторович. — М.: МАШГИЗ, 1960. — 744 с.

12. Тимошенко С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко. Дж. Гудьер. — М.: Наука, 1979. — 560 с.

## References

1. Birger I.A. Prochnost', ustoichivost', kolebaniya: sprav.: v 3 t. / I.A. Birger. — М.: Mashinostroyeniye. 1968.

2. Elovenko D.A. Analiz vliyaniya distantsionnykh planok nagrevatel'nykh elementov na neravnomernost' napryazhennogo sostoyaniya nesushchei stenki sosuda vysokogo davleniya metodom konechnykh elementov na baze programmnogo kompleksa MSC.MARC / D.A. Elovenko, P.G. Pimshtein, O.V. Repetskii // Informatsionnye tekhnologii i problemy matematicheskogo modelirovaniya slozhnykh sistem. — Irkutsk: IITM IrGUPS, 2011. — S. 79–83.

3. Elovenko D.A. Analiz napryazhennogo sostoyaniya uprugoi poluploskosti, nagruzhennoi postoyannym davleniem na ogranichennykh promezhutochnykh uchastkakh s zadannym periodom metodom konechnykh elementov na baze programmnogo kompleksa MSC.MARC / D.A. Elovenko, O.V. Repetskii // Izvestiya Irkutskoi gosudarstvennoi ekonomicheskoi akademii. — 2011. — № 5. — S. 171–175.

4. Elovenko D.A. Issledovanie vliyaniya distantsionnykh planok nagrevatel'nykh elementov i ikh konstruktivnykh parametrov na napryazhennoe sostoyanie tsentral'noi stenki v novykh konstruktivnykh avtoklavov vysokogo davleniya / D.A. Elovenko, O.V. Repetskii // Vestnik stipendiatov DAAD. — 2011. — № 1 (8). — S. 25–27.

5. Elovenko D.A. Issledovanie teplofizicheskikh kharakteristik teploizolyatsionnykh materialov dlya novykh konstruktivnykh tsilindricheskikh stenok avtoklavov vysokogo davleniya / D.A. Elovenko, O.V. Repetskii // Izvestiya Irkutskoi gosudarstvennoi ekonomicheskoi akademii. — 2011. — № 6. — S. 201–206.



6. Elovenko D.A. K voprosu o raschete tsilindricheskikh stenok so vstroennymi nagrevatel'nymi elementami v avtoklavakh vysokogo davleniya / D.A. Elovenko, O.V. Repetskii // Izvestiya Irkutskoi gosudarstvennoi ekonomicheskoi akademii (Baikal'skii gosudarstvennyi universitet ekonomiki i prava) (elektronnyi zhurnal). 2012. № 1. URL: <http://eizvestia.isea.ru/reader/article.aspx?id=11860>. (Identifikats. nomer stat'i v NTTs «Informregistr» 0421200101\0050).

7. Elovenko D.A. O ratsional'nom proektirovanii distantsionnykh planok nagrevatel'nykh elementov v avtoklavakh vysokogo davleniya / D.A. Elovenko, O.V. Repetskii // Izvestiya Irkutskoi gosudarstvennoi ekonomicheskoi akademii (Baikal'skii gosudarstvennyi universitet ekonomiki i prava) (elektronnyi zhurnal). 2011. № 5. URL: <http://eizvestia.isea.ru/reader/article.aspx?id=9724>. (Identifikats. nomer stat'i v NTTs «Informregistr» 0421100101\0260).

8. Elovenko D.A. Razrabotka programmy dlya rascheta temperaturnykh polei i napryazhenii v mnogoslonoinei stenke sosuda vysokogo davleniya / D.A. Elovenko // Primenenie matematicheskikh metodov i informatsionnykh tekhnologii v ekonomike: sb. nauch. tr. — Irkutsk: Izd-vo BGUEP, 2011. — S. 40–45.

9. Elovenko D.A. Eksperimental'noe issledovanie modeli avtoklava dlya gidrotermal'nogo sinteza mineralov / D.A. Elovenko, P.G. Pimshtein, O.V. Repetskii, D.V. Tatarinov // Vestnik stipendiatov DAAD. — 2010. — № 1 (7). — S. 11–19.

10. Kovaleno A.D. Osnovy termouprugosti / A.D. Kovaleno. — Kiev: Naukova dumka, 1970. — 308 s.

11. Kontorovich Z.B. Osnovy rascheta khimicheskikh mashin i apparatov / Z.B. Kontorovich. — M.: MASHGIZ, 1960. — 744 s.

12. Timoshenko S.P. Teoriya uprugosti / S.P. Timoshenko. Dzh. Gud'er. — M.: Nauka, 1979. — 560 s.

### 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, г. Иркутск, e-mail: repetskiy@isea.ru.

### Authors

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

Repetskiy Oleg Vladimirovich — Doctor of Science in Engineering, Professor, Irkutsk, e-mail: repetskiy@isea.ru.