

## Напряженно-деформированное состояние радиационно-теплового экрана реактора АЭС

*Э.К. Агаханов, Р.М. Курачев*

*Дагестанский государственный технический университет, Махачкала*

**Аннотация:** В статье проводится исследование напряженно-деформированного состояния защитной конструкции с учетом температурных и радиационных воздействий. Расчету напряженно-деформированного состояния предшествует определение распределения физических полей в толще конструкции. Рассматривается стационарное температурное поле. Учитываются внутренние источники тепловыделений, обусловленные ионизирующим излучением. Распределение флюенса нейтронов определяется на основе диффузионного приближения. Выполняется сравнение результатов с учетом и без учета наведенной неоднородности.

**Ключевые слова:** толстостенные цилиндры, напряженно-деформированное состояние, численные методы, флюенс нейтронов, температурное поле, неоднородность, метод конечных элементов.

Радиационно-тепловой экран представляет собой жестко заземленную в основании толстостенную цилиндрическую оболочку (рис. 1). При воздействии на данную конструкцию высоких температур и ионизирующего излучения происходит изменение физико-механических характеристик материала. Поэтому расчету напряженно-деформированного состояния конструкции предшествует определение распределения физических полей в ее толще. Как правило, решается несвязная задача, то есть предполагается, что изменение напряженно-деформированного состояния не приводит к изменению распределения физических полей.

Влияние температурных и радиационных воздействий на модуль упругости бетона учитывается следующим образом [1-3]:

$$E(T, \Phi) = E_0 \cdot k_T \cdot k_\Phi, \quad (1)$$

где  $T$  – температура,  $\Phi$  – флюенс (интегральный поток) нейтронов,  $E_0$  – модуль упругости бетона нормальной температуры при отсутствии облучения, коэффициент  $k_T$  учитывает влияние температуры на модуль

упругости, а коэффициент  $k_{\Phi}$  учитывает влияние на модуль упругости бетона флюенса нейтронов.

Коэффициенты  $k_T$  и  $k_{\Phi}$  вычисляются следующим образом:

$$k_T = \sum_{n=0}^N \beta_n T^n; \quad k_{\Phi} = \gamma_1 - \alpha_1 \lg(\beta_1 \Phi), \quad (2)$$

где  $\beta_n$ ,  $\gamma_1$ ,  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$  - эмпирические параметры.

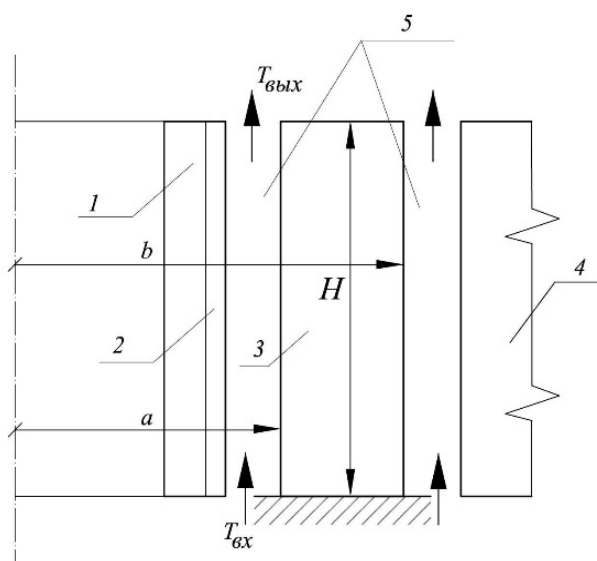


Рис. 1. – Конструкция сухой защиты: 1 – корпус реактора; 2 – теплоизоляция; 3 – радиационно-тепловой экран; 4 – биологическая защита; 5 – каналы охлаждения

Решение задачи о распределении температурного поля в толще конструкции с учетом зависимости коэффициента теплопроводности от температуры приведено в работе [4]. Дифференциальное уравнение для осесимметричной стационарной задачи теплопроводности в цилиндрических координатах с учетом внутренних источников тепловыделений имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] = -W(r, z). \quad (3)$$

В данном уравнении  $\lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности,  $W(r, z)$  – плотность внутренних источников тепловыделений, определяемая по формуле:

$$W(r, z) = W_0 + W_1 \exp[-\delta(r - a)] \sin \frac{\pi z}{H}, \quad (4)$$

где  $W_0$ ,  $W_1$ ,  $\delta$  – параметры, определяемые опытным путем.

На верхней и боковых поверхностях конструкции имеет место конвективный теплообмен. Соответствующие граничные условия запишутся в виде:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_\infty) = 0, \quad (5)$$

Для нижнего торца цилиндра предполагается, что масса основания на порядок выше массы защитной конструкции. Исходя из этого, температуру на границе можно считать заданной функцией:

$$T_0(r) = T_{A0} \frac{\ln(b/r)}{\ln(b/a)} + T_{B0} \frac{\ln(r/a)}{\ln(b/a)}. \quad (6)$$

Уравнения (3) с граничными условиями (5) и (6) может быть решено численно при помощи метода конечных элементов [4, 6-9] или метода конечных разностей [10,11]. В статье [4] установлено, что зависимость коэффициента теплопроводности от температуры можно не учитывать.

Расчет температурного поля нами выполнялся при  $a = 2$  м,  $b = 3$  м,  $h = 3$  м,  $W_0 = 6,7 \cdot 10^{-4}$  Вт/м<sup>3</sup>,  $W_1 = 1,6 \cdot 10^{-3}$  Вт/м<sup>3</sup>,  $\delta = 10$ ,  $\lambda = 1.51$  Вт/(м·°С). Температуры среды у внутренней поверхности  $T_{\infty,a} = 50$  °С, у внешней поверхности  $T_{\infty,b} = 20$  °С, на верхнем торце  $T_{\infty,H} = 35$  °С. Коэффициенты теплоотдачи:  $h_a = 5$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С),  $h_b = 35$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С),  $h_H = 20$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

Для определения распределения флюенса нейтронов можно использовать диффузионное приближение [1]:

$$\nabla^2 \Phi - \frac{\Phi}{L^2} = 0, \quad (7)$$

где  $L$  – длина диффузии.

Помимо изменения деформационных свойств при воздействии ионизирующего излучения в бетоне возникают радиационные деформации, величину которых можно вычислить по формуле:

$$\varepsilon_p = \frac{\alpha \varepsilon_{max} [\exp(\beta \Phi) - 1]}{\varepsilon_{max} + \alpha \exp(\beta \Phi)}, \quad (8)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – эмпирические параметры,  $\varepsilon_{max}$  – максимальная величина радиационной деформации.

При  $r = a$  флюенс считается заданным ( $\Phi = \Phi_0$ ), а при  $r = b$   $\Phi = 0$ . Расчеты выполнялись при  $\Phi_0 = 4 \cdot 10^{24}$  нейтрон/м<sup>2</sup>,  $L = 0,16$  м,  $\gamma_1 = 0,8$ ,  $\alpha_1 = 0,7$ ,  $\beta_1 = 10^{-24}$  м<sup>2</sup>/нейтрон,  $\alpha = 0,01$ ,  $\varepsilon_{max} = 0,01$ ,  $\beta = 3 \cdot 10^{-24}$  м<sup>2</sup>/нейтрон,  $E_0 = 2 \cdot 10^4$  МПа,  $\nu = 0,2$ . Полученный в результате график изменения модуля упругости бетона в толще конструкции под действием температуры и радиации приведен на рис.2.

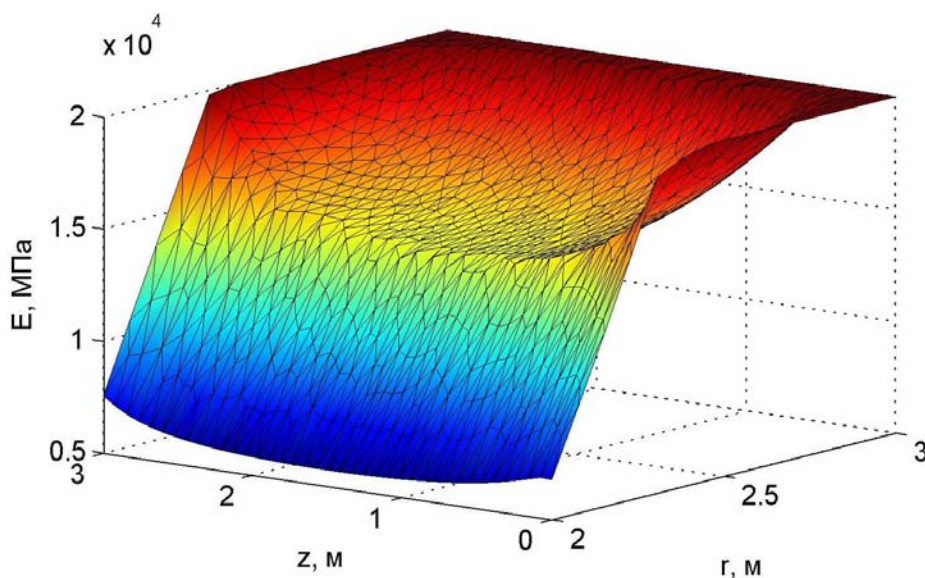


Рис. 2. – Распределение модуля упругости в толще конструкции

Методика конечно-элементного расчета с учетом двумерной неоднородности материала приводится в работе [1]. На рис. 3 – 6 представлены соответственно графики распределения напряжений  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$  и  $\tau_{rz}$ . Закрашенным поверхностям соответствует результат для однородного

материала ( $E = \text{const}$ ), сетчатым поверхностям соответствует результат для неоднородного материала.

Анализируя приведенные выше графики, можно сделать вывод, что учет неоднородности приводит к значительному снижению напряжений. Следует также отметить, что на величине перемещений учет неоднородности практически не отразился.

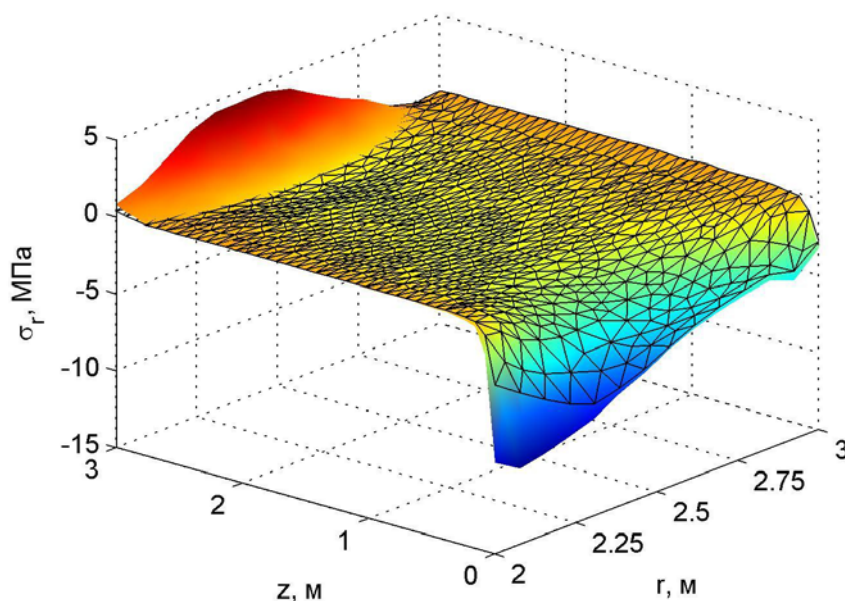


Рис. 3. – Изменение напряжений  $\sigma_r$  в толще цилиндра

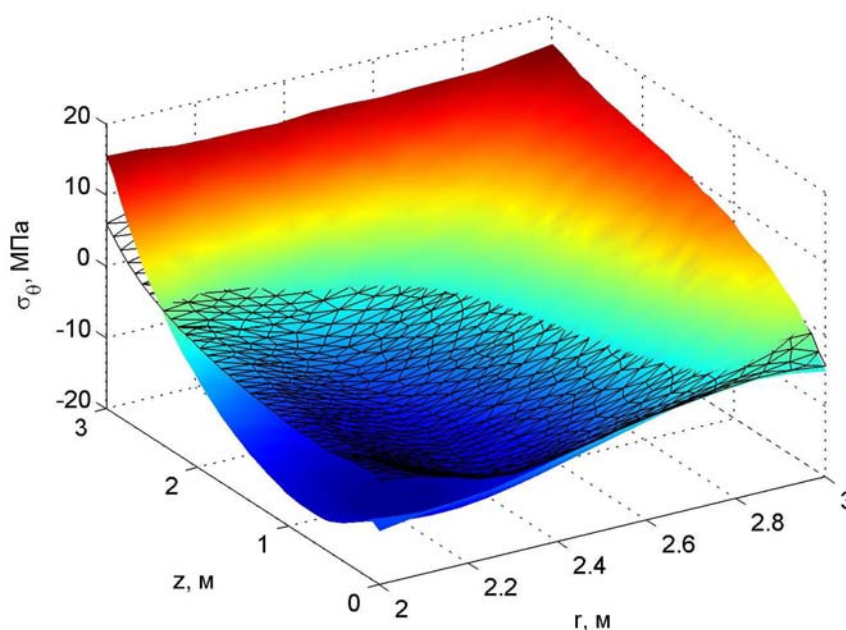


Рис. 4. – Изменение напряжений  $\sigma_\theta$  в толще цилиндра

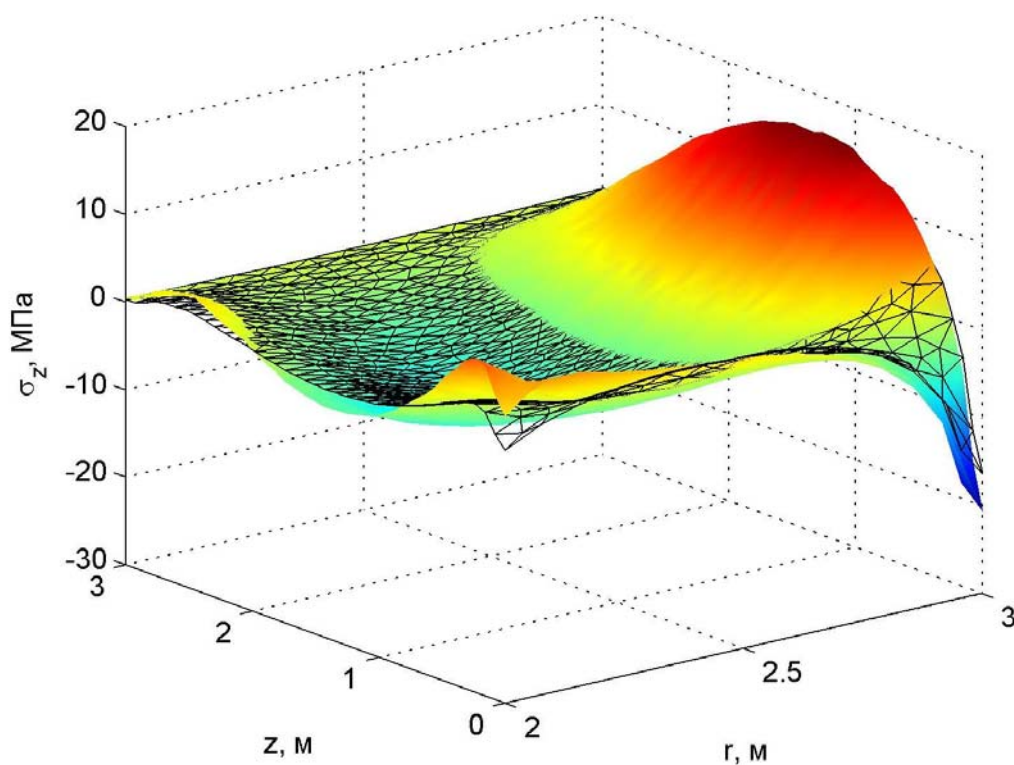


Рис. 5. – Изменение напряжений  $\sigma_z$  в толще цилиндра

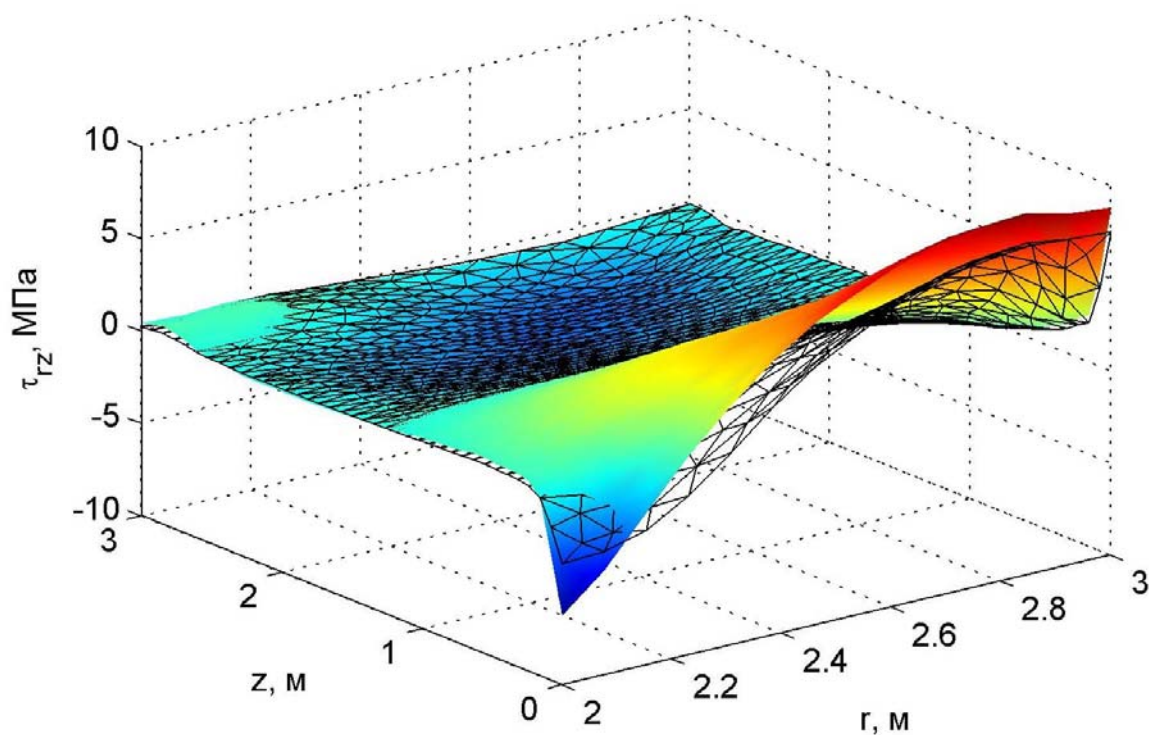


Рис. 6. – Изменение напряжений  $\tau_{rz}$  в толще цилиндра

## Литература

1. Курачев Р.М., Чепурненко А.С., Литвинов С.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния корпуса высокого давления с учетом воздействия физических полей // Современные наукоемкие технологии. 2016. №2–3. С. 430–434. URL: [top-technologies.ru/ru/article/view?id=35647](http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=35647)
2. Языев Б.М., Литвинов С.В., Козельский Ю.Ф. Плоская деформация элементов цилиндрических конструкций под действием физических полей // Инженерный вестник Дона, 2013, №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1616](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1616)
3. Литвинов С.В., Козельский Ю.Ф., Языев Б.М. Расчёт цилиндрических тел при воздействии теплового и радиационного нагружений // Инженерный вестник Дона, 2012, №3 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/954](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/954)
4. Агаханов Э.К., Курачев Р.М., Чепурненко А.С., Кулинич И.И. Нелинейная задача теплопроводности для радиационно-теплового экрана реактора АЭС // Инженерный вестник Дона, 2015, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3421](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3421)
5. Агаханов Э.К., Курачев Р.М., Чепурненко А.С., Языев Б.М. Моделирование изменения деформационных свойств бетона в защитных конструкциях реакторов АЭС под действием ионизирующего излучения // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016. №1. С. 8-14.
6. Дудник А.Е., Чепурненко А.С., Литвинов С.В., Денего А.С. Плоское деформированное состояние полимерного цилиндра в условиях термовязкоупругости // Инженерный вестник Дона, 2015, № 2-2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3063](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3063)



7. Дудник А.Е., Чепурненко А.С., Литвинов С.В. Нестационарная задача теплопроводности для электрического кабеля с ПВХ изоляцией // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 6. С. 49-51.

8. Chepurnenko A. S., Yazyev S.B., Evtushenko A.I. Non-Stationary temperature field modeling in electric cable with PVC insulation // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. Pp. 1–5. URL: [ieeexplore.ieee.org/document/8076450/](http://ieeexplore.ieee.org/document/8076450/)

9. Kurachev R.M., Vysokovsky D.A., Chepurnenko A.S., Shvetsov P.A. Modeling of Reactor Dry Protection Stressed-Strain State Taking into Account Temperature and Radiation Exposure // Materials Science Forum. 2018. Vol. 931. Pp. 107-112.

10. Дудник А.Е., Чепурненко А.С., Никора Н.И. Плоская осесимметричная задача термовязкоупругости для полимерного цилиндра // Инженерный вестник Дона, 2015, № 1-2. [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2816](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2816)

11. Языев Б.М., Чепурненко А.С., Литвинов С.В., Аваков А.А. Построение модели равнопрочного толстостенного цилиндра при силовых и температурных воздействиях // Научное обозрение. 2014. № 9-3. С. 863-866.

### References

1. Kurachev R.M., Chepurnenko A.S., Litvinov S.V. Sovremennyye naukojemkiye tekhnologii. 2016. №2–3. pp. 430–434.

2. Yazyev B.M., Litvinov S.V., Kozelsky Yu.F. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1616](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1616)

3. Litvinov S.V., Kozelsky Yu.F., Yazyev B.M. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №3 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/954](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/954)

4. Agakhanov E.K., Kurachev RM, Chepurnenko A.S., Kulinich I.I. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3421](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3421)





5. Agakhanov E.K., Kurachev R.M., Chepurnenko A.S., Yazyyev B.M. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. 2016. №1. pp. 8-14.

6. Dudnik A.E., Chepurnenko A.S., Litvinov S.V., Denego A.S. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2015, № 2-2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3063](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3063)

7. Dudnik A.Ye., Chepurnenko A.S., Litvinov S.V., Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya, 2015, № 6. pp. 49-51.

8. Chepurnenko A.S., Yazyyev S.B., Evtushenko A.I. Non-Stationary temperature field modeling in electric cable with PVC insulation. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. Pp. 1–5. URL: [ieeexplore.ieee.org/document/8076450/](http://ieeexplore.ieee.org/document/8076450/)

9. Kurachev R.M., Vysokovsky D.A., Chepurnenko A.S., Shvetsov P.A. Modeling of Reactor Dry Protection Stressed-Strain State Taking into Account Temperature and Radiation Exposure. Materials Science Forum. 2018. Vol. 931. Pp. 107-112.

10. Dudnik A.E., Chepurnenko A.S., Nikora N.I. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2015, № 1-2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2816](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2816)

11. Yazyyev B.M., Chepurnenko A.S., Litvinov S.V., Avakov A.A. Nauchnoye obozreniye. 2014. № 9-3. Pp. 863-866.