

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ АЭС С УЧЕТОМ РЕЗУЛЬТАТОВ ВИБРОДИАГНОСТИКИ

А.В. ЕСЕНОВ, канд. техн. наук

В.А. КОРОТКОВ, канд. техн. наук

А.В. КУЗЬМИНОВ

П.А. РОДИН✉

Н.М. СИДОРОВ

Т.З. ЮГАЙ

*ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» Ростехнадзора,
ул. Малая Красносельская, д. 2/8, к. 5, г. Москва, 107140, Российская Федерация*

Аннотация

Введение. Статья носит постановочный характер. В ней представляются методические шаги на пути решения вопроса об оценке ресурса действующих блоков с учетом деградации динамических свойств железобетонных конструкций, полученных методами вибродиагностики на примере «горячих» помещений объектов использования атомной энергии.

Целью статьи является уточнение метода оценки напряженно-деформированного состояния и прочности строительных конструкций АЭС с учетом старения элементов из железобетона при воздействии различных внешних факторов.

Материалы и методы. Предлагается методика оценки прочности (несущей способности) и устойчивости строительных конструкций АЭС, в которых в результате длительной эксплуатации произошли существенные изменения в свойствах железобетона, вызванные нарушением температурного режима их эксплуатации, что привело к ослаблению жесткостей конструктивных элементов и, как следствие, снижению их прочности и устойчивости. В связи с этим для оценки напряженно-деформированного состояния и прочности «горячих» помещений необходимо сделать расчет с учетом истории нагружения конструкций и процесса развития трещин, начиная от времени начала эксплуатации блока до настоящего времени. Однако за время эксплуатации здания не проводился анализ истории температурного нагружения. Также нет подходящей программы для ЭВМ нелинейного динамического анализа, которая учитывает историю нагружения при развитии трещин в железобетонных конструкциях и которая прошла аттестацию в Ростехнадзоре. Компенсация отмеченных недостатков возможна за счет проведения вибродиагностики стен и полов «горячих» помещений и определения следующих динамических характеристик: частот и форм собственных колебаний, логарифмических декрементов затуханий, модулей деформаций и коэффициентов Пуассона для каждого пола и стены.

Далее, после получения экспериментальной информации, необходимо провести расчет напряженно-деформированного состояния и прочности, в котором полученные данные из эксперимента будут использоваться в качестве исходной информации. Методика расчета базируется на неклассическом методе модальной суперпозиции с применением программ для ЭВМ типа ABAQUS, ANSYS, NASTRAN.

Также в статье в качестве проверки методов вибродиагностики представлена оценка динамических характеристик пола на отметке +13,450.

Результаты. По результатам эксперимента получены значения модуля деформации и частоты собственных колебаний, которые не выходят за пределы диапазона расчетных значений.

Выводы. Представлена методика оценки прочности строительных конструкций действующих АЭС с учетом старения железобетона под воздействием внешних факторов. В работе также проведена оценка достоверности динамических характеристик, полученных методами вибродиагностики.

Ключевые слова: «горячие» помещения, вибродиагностика, динамические характеристики, модуль деформации, частота собственных колебаний

Для цитирования: Есенов А.В., Коротков В.А., Кузьминов А.В., Родин П.А., Сидоров Н.М., Югай Т.З. Оценка прочности и устойчивости железобетонных конструкций АЭС с учетом результатов вибродиагностики. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2022;34(3):79–91. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3\(34\)-79-91](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3(34)-79-91)

Вклад авторов

Коротков В.А. – разработка метода, участие в написании статьи.

Есенов А.В., Кузьминов А.В., Родин П.А., Сидоров Н.М., Югай Т.З. – участие в написании статьи, анализ результатов.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 08.07.2022

Поступила после рецензирования 27.07.2022

Принята к публикации 16.08.2022

STRENGTH AND STABILITY ASSESSMENT OF NPP REINFORCED CONCRETE STRUCTURES REGARDING THE RESULTS OF VIBRATION ANALYSIS

A.V. ESENOV, Cand. Sci. (Engineering)

V.A. KOROTKOV, Cand. Sci. (Engineering)

A.V. KUZMINOV

P.A. RODIN✉

N.M. SIDOROV

T.Z. YUGAI

Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Malaya Krasnoselskaya str., 2/8, bld. 5, Moscow, 107140, Russian Federation

Abstract

Introduction. The article outlines methodological stages when assessing the resource of nuclear power plant (NPP) operation units with regard to degradation in the dynamic characteristics of reinforced concrete structures obtained by means of vibration analysis methods on the example of hot cells of nuclear installations.

Aim: to improve the method currently used for assessing the stress-strain behavior and strength of NPP structures regarding the aging process of reinforced concrete elements under various environmental exposures.

Materials and methods. A methodology is proposed for assessing the strength (loading capacity) and stability of NPP structures where significant variations in the properties of reinforced concrete elements have taken place under the action of continuous operation and thermal mode disturbances, thus weakening the element stiffness and, as a result, reducing their strength and stability. Therefore, in order to evaluate the stress-strain behavior and strength of hot cells, calculations should be carried out taking into account the history of structure loading and the process of crack development over the entire operation period. However, no analysis of the history of thermal loading has been performed during the operation period of the NPP under study. In addition, there is a lack of suitable software packages for nonlinear dynamic analysis certified by Rostekhnadzor capable of considering the loading history and crack development in reinforced concrete structures. In order to eliminate the mentioned shortcomings, a vibration analysis of the walls and floors of hot cells should be performed to determine the following dynamic characteristics: natural vibration frequency and mode, logarithmic decrement of damping, deformation modulus and Poisson ratio for each wall and floor. Further, based on the obtained experimental data, the stress-strain behavior and strength of hot cells should be calculated using experimental data as calculation input information. The calculation methodology is based on a nonclassical method of modal superposition using the ABAQUS, ANSYS, and NASTRAN software packages. In order to verify the correctness of the results obtained by vibration analysis, an assessment of floor dynamic characteristics at the point +13.450 was conducted.

Results. The values of deformation modulus and natural vibration frequency obtained in the conducted experiment were found to agree with the calculated values.

Conclusions. A methodology for assessing the strength of NPP structures regarding the aging of reinforced concrete under various environmental exposures was presented. The validity of dynamic characteristics obtained using vibration analysis was evaluated.

Keywords: hot cells, vibration analysis, dynamic characteristics, deformation modulus, natural vibration frequency

For citation: Esenov A.V., Korotkov V.A., Kuzminov A.V., Rodin P.A., Sidorov N.M., Yugai T.Z. Strength and stability assessment of NPP reinforced concrete structures regarding the results of vibration analysis. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2022;34(3):79–91. (In Russ.) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3\(34\)-79-91](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-3(34)-79-91)

Author contribution statements

Korotkov V.A. – the method development, the manuscript preparation.

Esenov A.V., Kuzminov A.V., Rodin P.A., Sidorov N.M., Yugai T.Z. – the manuscript preparation, the analysis of results.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 08.07.2022

Revised 27.07.2022

Accepted 16.08.2022

Введение

На этапах проектирования новых блоков вопросы расчета НДС и прочности строительных конструкций АЭС определяются в соответствии с российскими нормами [1]. Исходные данные для элементов железобетона при проведении таких расчетов соответствуют предусмотренным в проекте классам бетона.

Для выполнения подобных расчетов российские и зарубежные нормы рекомендуют применять различные методы динамического анализа [2], однако из теоретических соображений наиболее достоверным является неклассический метод модальной суперпозиции [3], позволяющий учитывать грунтовый массив в виде пружин и демпферов. Кроме того, метод реалистично учитывает демпфирование в различных материалах конструкции и гистерезисное демпфирование в грунте за счет применения опции: модальное композитное демпфирование.

Для применения данного метода в расчетах эксплуатируемых энергоблоков АЭС необходимо учитывать факторы старения. Прочность и устойчивость строительных конструкций зданий и сооружений АЭС напрямую зависит от их технического состояния. При появлении дефектов может произойти снижение несущей способности конструкций. Так, в результате действия повышенных температур (до +285 °С вместо +90 °С при нормальной эксплуатации) в строительных конструкциях «горячих» помещений блока АЭС стали возникать не предусмотренные проектом трещины (далее – запроектный случай), что привело к существенному ослаблению жесткостей конструктивных элементов (стен и полов) и, как следствие, снижению их прочности за почти 40-летний период эксплуатации блока.

Применение неразрушающих методов контроля конструкций, позволяющих определить фактические деформационные характеристики конструкций в местах появления дефектов, позволяет отразить в расчете реальное напряженно-деформированное состояние конструкции и установить их фактическую несущую способность. Одними из таких методов являются неразрушающие методы вибродиагностики, основанные на взаимосвязи деформационных характеристик с динамическими характеристиками строительных конструкций. Неклассический метод модальной суперпозиции позволяет достоверно учитывать полученные в результате вибродиагностики динамические характеристики «горячих» помещений (частоты и формы собственных колебаний, модули деформации, логарифмические декременты затуханий, коэффициенты Пуассона) для оценки НДС и прочности.

Таким образом, в данной статье предлагается подход оценки НДС и прочности строительных конструкций АЭС с учетом старения элементов из железобетона при воздействии различных внешних факторов. Подход основывается на следующих этапах:

- геометрически подобном конечно-элементном моделировании систем сооружение – основание;
- получении динамических характеристик фрагментов зданий методами вибродиагностики для дальнейшего использования в расчетах;
- применение неклассического метода модальной суперпозиции для оценки НДС и прочности здания.

Применение вибродиагностики

Одним из перспективных подходов для оценки динамических характеристик зданий, имеющих длительный срок эксплуатации, является вибродиагностика. В ее основе лежит исследование динамических процессов фрагментов здания (пол, стена), вызванных ударными нагрузками. В рамках вибродиагностики определяются динамические характеристики следующим образом:

- по показаниям вибродатчиков, расположенных на исследуемом фрагменте, определяется зависимость ускорения от времени;

- с помощью преобразования Фурье полученный сигнал преобразуется из временной области в частотную;
- далее выделяются пики на резонансных частотах для получения частот собственных колебаний;
- с помощью обратного преобразования Фурье производится получение импульсной реализации по выделенному тону во временной области для расчета логарифмического декремента затуханий;
- за счет выделения крутильного тона колебаний возможно определение модуля сдвига и коэффициента Пуассона.

На рис. 1 показан пример выделения первого тона собственных колебаний пола на отметке +13,450. Как видно из рис. 1, частота собственных колебаний составляет 37,5 Гц.

Оценка динамических характеристик пола

Рассмотрим состояние пола на отметке +13,450, так как данный фрагмент «горячих» помещений наиболее сильно подвергся температурному воздействию. При оценке динамических характеристик пол моделировался прямоугольной композитной плитой размерами $a_1 = 11,45$ м и $a_2 = 6$ м и толщиной $h = 0,7$ м. На рис. 2 представлено сечение плиты, состоящей из монолитного бетона, имеющего проектный модуль деформации $E_1 = 2,8 \times 10^7$ кН/м² и из несъемной опалубки, имеющей проектный модуль деформации $E_2 = 3,25 \times 10^7$ кН/м². Значение коэффициента Пуассона составило $\nu = 0,2$, массовая плотность $\rho = 2,4$ т/м³. Размеры сечения плиты: $h_1 = 0,62$ м, $h_2 = 0,08$ м. Площади составных частей сечения $F_1 = 0,62 \times 11,45 = 7,1$ и $F_2 = 0,08 \times 11,45 = 0,916$. $P_1 = E_1 \times F_1 = 1,988 \times 10^8$ и $P_2 = E_2 \times F_2 = 0,297 \times 10^8$. $l_1 = 0,31 - 0,26 = 0,05$ и $l_2 = 0,26 + 0,04 = 0,3$.

Определим осредненное значение модуля деформации плиты относительно нейтральной оси из условия:

$$(EJ)_0 = (E_1 \times \frac{J_1}{J} + E_2 \times \frac{J_2}{J}) \times J = E_0 \times J,$$

откуда

$$E_0 = \frac{E_1 \times J_1 + E_2 \times J_2}{J},$$

где J, J_1, J_2 – моменты инерции сечения и его частей относительно нейтральных осей.

Для определения осредненного значения модуля деформации плиты E_0 в соответствии с рис. 3 определим положение нейтральной оси (x) из условия равенства моментов:

$$P_2 \times (0,04 + x) = P_1 \times (0,31 - x),$$

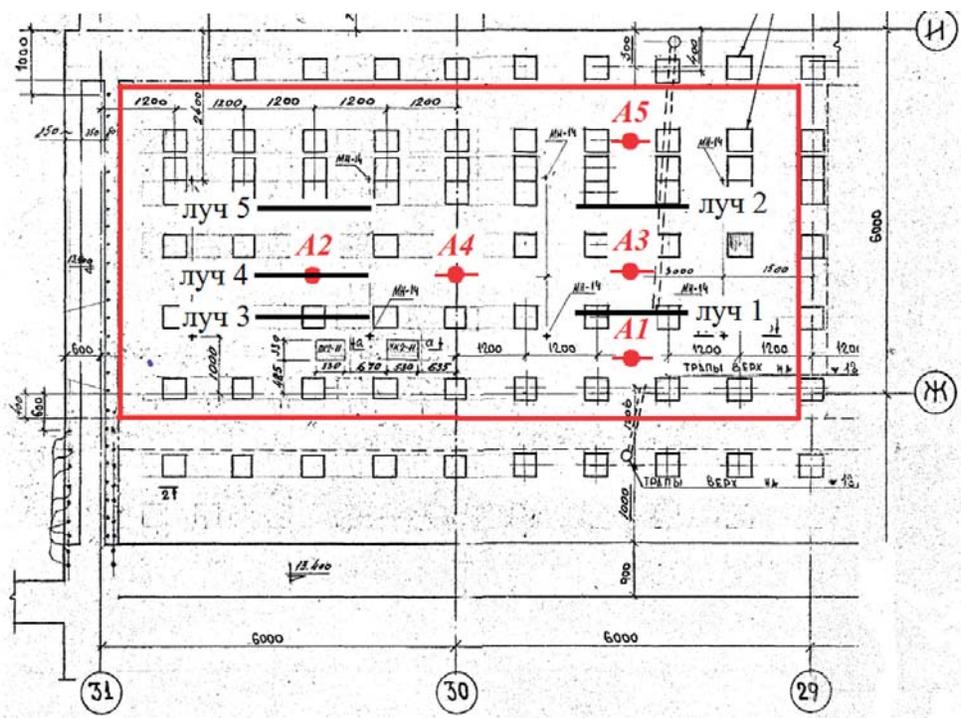
$$x = \frac{P_1 \times 0,31 - P_2 \times 0,04}{P_1 + P_2} = 0,264.$$

С учетом этого получим:

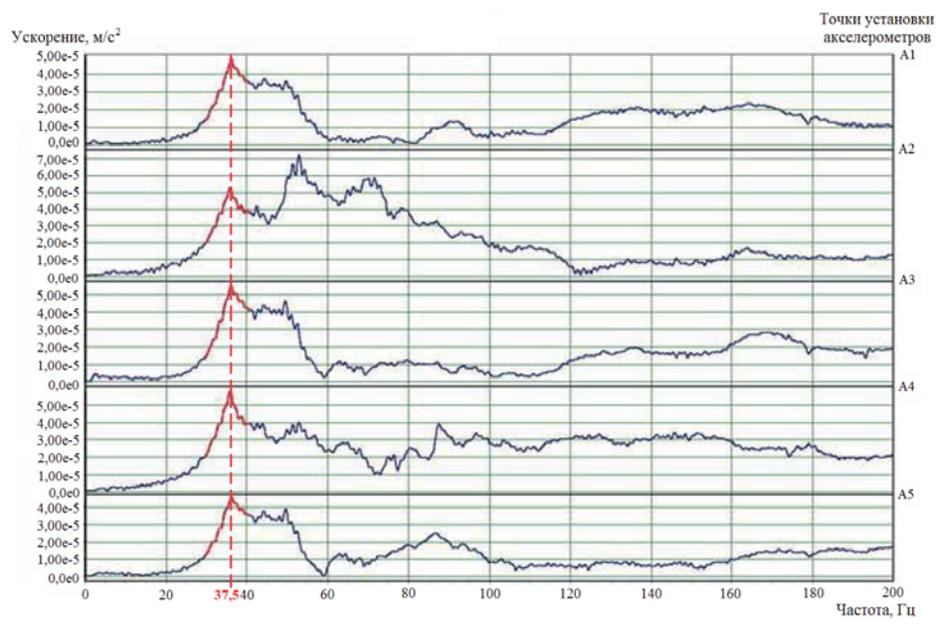
$$J_1^0 = \frac{a_1 \times h_1^3}{12} = 0,2274 \text{ м}^4,$$

$$J_1^x = F_1 l_1^2 = 0,01775 \text{ м}^4,$$

$$J_1 = J_1^0 + J_1^x = 0,24515 \text{ м}^4,$$



а – точки установки акселерометров
 а – accelerometers points



б – преобразованный сигнал из временной в частотную область
 б – converted signal from time to frequency domain

Рис. 1. Выделение 1 тона свободных колебаний для пола на отметке +13,450
Fig. 1. Determining 1 mode of natural vibrations for floor at the point +13.450

$$J_2^0 = \frac{a_1 \times h_2^3}{12} = 0,0005 \text{ м}^4,$$

$$J_2^x = F_2 l_2^2 = 0,08244 \text{ м}^4,$$

$$J_2 = J_2^0 + J_2^x = 0,08294 \text{ м}^4,$$

$$J = \frac{a_1 \times h^3}{12} = 0,3272 \text{ м}^4.$$

$$E_0 = \frac{2,8 \times 0,24515 + 3,25 \times 0,08294}{0,3272} = 3 \times 10^7 \text{ кН/м}^2.$$

Величину цилиндрической жесткости определим следующим образом:

$$D_1 = \frac{E_1 \times h_1^3}{12(1-\nu^2)} = 5,8 \times 10^5 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

$$D_2 = \frac{E_2 \times J_2}{a_1(1-\nu^2)} = 2,6 \times 10^5 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

$$D_0 = D_1 + D_2 = 0,8 \times 10^6 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

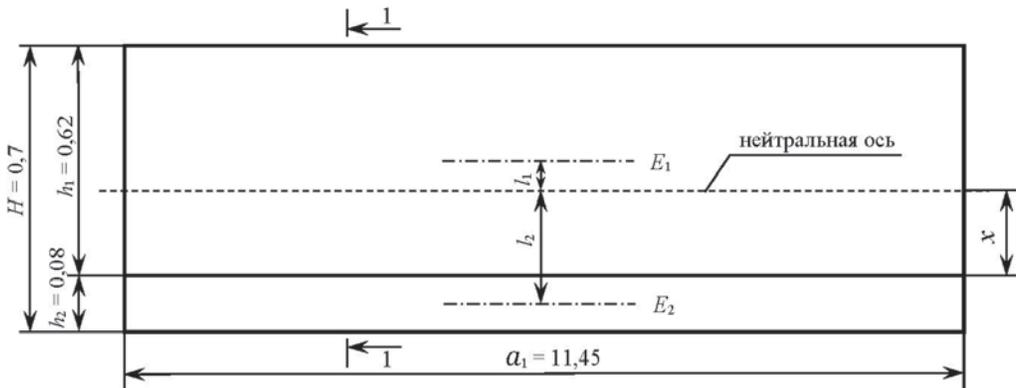


Рис. 2. Сечение фундаментной плиты пола
 Fig. 2. Cross-section of floor foundation slab

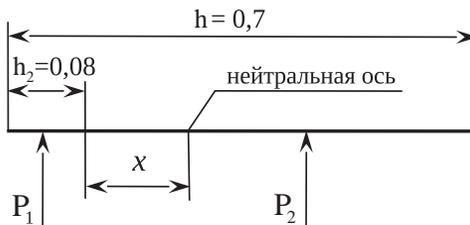


Рис. 3. Поперечный разрез 1-1
 Fig. 3. Cross-sectional view 1-1

где D_0 – средненное значение цилиндрической жесткости плиты, соответствующее проектным значениям модулей деформации.

В соответствии с [4] частота первого тона собственных колебаний пола при свободном опирании и при $m_1 = m_2 = 1$ определяется как:

$$\omega_0 = \pi^2 \left(\frac{m_1}{a_1^2} + \frac{m_2}{a_2^2} \right) \sqrt{\frac{D_0}{\rho \times h}} = 238 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 38 \text{ Гц},$$

а в случае жесткого закрепления:

$$\omega_0 = \frac{22,37}{a_1^2} \sqrt{1 + 0,605 \times \frac{a_1^2}{a_2^2} + \frac{a_1^4}{a_2^4}} \times \sqrt{\frac{D_0}{\rho \times h}} = 477 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 76 \text{ Гц}, a_1 > a_2.$$

Таким образом, значение частоты собственных колебаний для рассматриваемого пола в системе здания лежит в диапазоне от 38 до 76 Гц для проектных свойств бетона. Частота первого тона собственных колебаний связана с жесткостью плиты соотношением:

$$\omega_0^2 = \frac{\alpha \times E_0 \times J}{M} - \text{частота для проектного значения модуля деформации,}$$

$$\omega_1^2 = \frac{\alpha \times E'_0 \times J}{M} - \text{частота для запроектного значения модуля деформации,}$$

где E'_0 – средненный модуль деформации для запроектного случая;
 α – коэффициент жесткости.

Из представленных формул получаем:

$$E'_0 = E_0 \times \frac{f_1^2}{f_0^2}.$$

Полученная формула позволяет определить модуль деформации пола, если известна частота собственных колебаний f_0 – для проектного случая и частота собственных колебаний f_1 – для запроектного случая с учетом старения железобетона. Однако для проектного случая не проводилась вибродиагностика и единственный способ точного определения частоты f_0 – это расчет всего здания, так как аналитические формулы дают только диапазон, в котором находится эта частота.

Зная из вибродиагностики значение частоты собственных колебаний пола для запроектного случая ($f_1 = 37,5$ Гц), по вышеприведенной формуле можно получить граничные значения модуля деформации:

$$E'_{0min} = 3,0 \times 10^7 \times \frac{(37,5)^2}{(76)^2} = 0,7 \times 10^7 \text{ кН/м}^2;$$

$$E'_{0max} = 3,0 \times 10^7 \times \frac{(37,5)^2}{(38)^2} = 2,9 \times 10^7 \text{ кН/м}^2.$$

Из табл. 1, соответствующей результатам вибродиагностики, среднее значение модуля деформации для запроектного случая составляет $E'_0 = 1,8 \times 10^7$ кН/м².

Таблица 1

Плита перекрытия на отметке +13,450, толщина 0,7 м

Table 1

Intermediate slab at the point +13,450, 0.7 m thick

Измерительный луч в различных частях поверхности конструкции	Скорость рэлеевских волн (м/с)	Эффективная толщина (м)	Скорость продольных волн V_p (м/с)	Модуль деформации (кН/м ²)
Луч 1	1450	0,7	2697	$1,4 \times 10^7$
Луч 2	1800	0,5	3348	$2,2 \times 10^7$
Луч 3	1650	0,7	3069	$1,8 \times 10^7$
Луч 4	1800	0,5	3348	$2,2 \times 10^7$
Луч 5	1400	0,7	2604	$1,3 \times 10^7$
Среднее	1620	-	3013	$1,8 \times 10^7$

Величина E'_0 не выходит за пределы расчетных значений E'_{0min} , E'_{0max} , что характеризует достоверность результатов вибродиагностики.

Далее рассмотрим получение частот собственных колебаний E'_0 при различных граничных условиях. Для этого необходимо дополнительно определить коэффициент Пуассона для запроектного случая, так как эта информация не представлена в результатах вибродиагностики.

В соответствии с [5] динамические значения модуля деформации и коэффициента Пуассона в бетоне могут вычисляться через скорости распространения продольных V_p и поперечных волн V_s следующим образом:

$$E = \rho \times V_s^2 \times \frac{3 \times \delta^2 - 4}{\delta^2 - 1}; \quad (1)$$

$$\nu = \frac{\delta^2 - 2}{2(\delta^2 - 1)}; \quad (2)$$

где
$$\delta = \frac{V_p}{V_s}. \quad (3)$$

Из (2) получим: $\delta^2 = \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}$, а из (3) получим $V_s = \frac{V_p}{\delta}$. Подставляя полученные выражения в (1), получим следующую связь модуля деформации, скорости продольных волн и коэффициента Пуассона:

$$E = \rho \times V_p^2 \frac{(1 - 2\nu) \times (1 + \nu)}{(1 - \nu)}.$$

Приводя подобные члены, данное выражение можно свести к уравнению относительно ν следующим образом:

$$\nu^2 + \left(0,5 - \frac{E}{2\rho \times V_p^2}\right) \times \nu - \left(0,5 - \frac{E}{2\rho \times V_p^2}\right) = 0.$$

Введя обозначения $a = 0,5 - \frac{E}{2\rho \times V_p^2}$, получим следующее квадратное уравнение:

$$v^2 + a \times v - a = 0.$$

Положительное решение данного уравнения имеет вид:

$$v = \sqrt{\frac{a^2}{4} + a} - \frac{a}{2}.$$

По полученной формуле определим значение коэффициента Пуассона для:

а) запроектных свойств бетона из табл. 1 $E = 1,8 \times 10^7 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$, $V_p = 3013 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $\rho = 2,4 \frac{\text{т}}{\text{м}^3}$.

$$2\rho \times V_p^2 = 4,36 \times 10^7 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2},$$

$$a = 0,5 - \frac{1,8 \times 10^7}{4,36 \times 10^7} = 0,5 - 0,41 = 0,09,$$

$$v = \sqrt{\frac{(0,09)^2}{4} + 0,09} - 0,045 = 0,303 - 0,045 = 0,258.$$

б) проектных свойств бетона $E = 3 \times 10^7 \text{ кН/м}^2$, $V_p = 3700 \text{ м/с}$, $\rho = 2,4 \text{ т/м}^3$.

$$2\rho \times V_p^2 = 6,6 \times 10^7 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2},$$

$$a = 0,5 - \frac{3 \times 10^7}{6,6 \times 10^7} = 0,5 - 0,46 = 0,04,$$

$$v = \sqrt{\frac{(0,04)^2}{4} + 0,04} - 0,02 = 0,2.$$

Как видно, проектное значение коэффициента Пуассона соответствует его нормативной величине, что подтверждает достоверность полученной формулы.

После расчета коэффициента Пуассона для запроектного случая получим осредненное значение цилиндрической жесткости следующим образом:

$$D'_1 = \frac{E'_0 \times h^3}{12(1-\nu^2)} = \frac{1,8 \times 10^7 \times (0,7)^3}{12 \times (1-(0,258)^2)} = 5,51 \times 10^5 \text{ кН}\cdot\text{м},$$

$$\omega'_1 = 3,14^2 \times \left(\frac{1}{11,45^2} + \frac{1}{36} \right) \times \sqrt{\frac{5,51 \times 10^5}{2,4 \times 0,7}} = 200 \text{ рад/с};$$

$f'_1 = 31,8 \text{ Гц}$ – частота собственных колебаний плиты для свободно опертых граничных условий,

$$\omega_1'' = \frac{22,37}{a_1^2} \sqrt{1 + 0,605 \times 3,62 + 13,10} \times \sqrt{\frac{5,51 \times 10^5}{2,4 \times 0,7}} = 391 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$f_1'' = 62,2$ – частота собственных колебаний плиты для жестко закрепленных граничных условий.

Следует отметить, что в рассматриваемом случае уточнение коэффициента Пуассона для запроектных свойств бетона не оказало существенного влияния на результаты.

Таким образом, экспериментальное значение частоты собственных колебаний плиты, составляющее 37,5 Гц для запроектного случая, лежит в пределах расчетных значений.

По итогам рассмотрения в табл. 2 представлены результаты сравнительного анализа расчетных и экспериментальных данных.

Таблица 2

Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Table 2

Correlation of calculated and experimental data

	Модуль деформации пола, E (кН/м²)	Частота собственных колебаний пола, f (Гц)
Расчет для запроектного случая	$0,7 \times 10^7 < E < 2,9 \times 10^7$	$31,8 < f < 62,2$
Эксперимент для запроектного случая	$E = 1,8 \times 10^7$	$f = 37,5$
Расчет для проектного случая	$E = 3,0 \times 10^7$	$38 < f < 76$

Как видно из представленной таблицы:

- экспериментальные значения модуля деформации и частоты собственных колебаний пола не выходят за пределы диапазона расчетных значений;
- проектное значение модуля деформации и частота собственных колебаний претерпели существенное падение из-за возникновения в «горячих» помещениях не предусмотренных проектом трещин в железобетоне.

Оценка НДС и прочности

Далее необходимо провести расчеты НДС здания при действии основных и особых сочетаний нагрузок и воздействий с учетом грунтового основания и с учетом динамических характеристик «горячих» помещений, полученных по результатам вибродиагностики. В результате расчетов формируются расчетные сочетания усилий, по которым определяются результирующие значения НДС и оценивается запас прочности.

Заключение

Представлена методика оценки прочности строительных конструкций действующих АЭС с учетом старения железобетона под воздействием внешних факторов. Методика базируется на неклассическом методе модальной суперпозиции, реализуемой с применением программ для ЭВМ, прошедших аттестацию в Ростехнадзоре, и на вибродиагностике стен и полов «горячих» помещений. В работе также проведена оценка достоверности динамических характеристик, полученных методами вибродиагностики.

В качестве недостатка методики следует отметить отсутствие результатов вибродиагностики по логарифмическим декрементам затуханий и коэффициентам Пуассона.

Список литературы

1. П-01-01-2021 Перечень нормативных правовых актов и нормативных документов, относящихся к сфере деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. *Раздел I. Технологический, строительный, энергетический надзор.* Москва; 2021.
2. АО «Концерн Росэнергоатом». МР 1.5.2.05.999.0025-2011 Расчет и проектирование сейсмостойких атомных станций [Интернет]. Режим доступа: https://eshop.rosenergoatom.ru/downloadable/download/linkSample/link_id/1622/
3. *Коротков В.А., Кузьминов А.В., Родин П.А.* Учет «грунтового» демфера в методе модальной суперпозиции при динамическом расчете строительных конструкций АЭС. Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022;(3):20–30. <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-3-20-30>
4. *Биргер И. А., Пановко Я.Г., ред.* Расчет конструкций на сейсмостойкость. Том 3. Москва: Машиностроение; 1968.
5. *Бирбраер А.Н.* Расчет конструкций на сейсмостойкость. Санкт-Петербург: Наука; 1988.

References

1. P-01-01-2021 A list of regulatory legal acts and regulatory documents related to the sphere of activity of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision. *Section I. Technological, construction, energy supervision.* Moscow; 2021 [in Russian].
2. МР 1.5.2.05.999.0025-2011 Calculation and design of earthquake-resistant nuclear power plants [Internet]. Available from: https://eshop.rosenergoatom.ru/downloadable/download/linkSample/link_id/1622/ [in Russian].
3. *Korotkov V.A., Kuzminov A.V., Rodin P.A.* Consideration of the “soil” damper in the modal superposition method during dynamic analysis of NPP civil structures. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety.* 2022;(3):20–30 [in Russian]. <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2022-3-20-30>
4. *Birger I.A., Panovko Ya.G., eds.* Calculation of structures for seismic resistance. Vol. 3. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1968 [in Russian].
5. *Birbraer A.N.* Calculation of structures for seismic resistance. St. Petersburg: Nauka Publ.; 1988 [in Russian].

Информация об авторах / Information about the authors

Амра Владимирович Есенов, канд. техн. наук, заместитель начальника отдела надежности строительных конструкций ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва
Amra V. Esenov, Cand. Sci. (Engineering), Deputy Chief of the Construction Reliability Division of the Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow

Владимир Анатольевич Коротков, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела надежности строительных конструкций, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва

Vladimir A. Korotkov, Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher of the Construction Reliability Division of the Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow

Александр Владимирович Кузьминов, старший научный сотрудник отдела надежности строительных конструкций, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва
Alexander V. Kuzminov, Senior Researcher of the Construction Reliability Division of the Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow

Павел Александрович Родин✉, научный сотрудник отдела надежности строительных конструкций, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва
e-mail: prodin@secnrs.ru
тел.: +7 (499) 264-40-45

Pavel A. Rodin✉, Researcher of the Construction Reliability Division of the Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow
e-mail: prodin@secnrs.ru
tel.: +7 (499) 264-40-45

Никита Маркович Сидоров, младший научный сотрудник отдела надежности строительных конструкций, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва
Nikita M. Sidorov, Junior Researcher of the Construction Reliability Division of the Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow

Тамара Захаровна Югай, старший научный сотрудник отдела надежности строительных конструкций, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва
Tamara Z. Yugai, Senior Researcher of the Construction Reliability Division of the Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author