4. Бортников Н.С., Гурбанов А.Г., Богатиков О.А., Карамурзов Б.С., Докучаев А.Я., Лексин А.Б., Газеев В.М., Шевченко А.В. Оценка воздействия захороненных промышленных отходов Тырныаузского вольфрамомолибденового комбината на экологическую обстановку (почвенно-растительный слой) прилегающих территорий Приэльбрусья (Кабардино-Балкарская республика, Россия) // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. 2013. № 5. с. 405-416.
5. Цены российского рынка на цветные и черные металлы - <http://www.infogeo.ru/metalls/info> (дата обращения: 12.04.2021).
6. Биосфера и ее ресурсы / Под ред. В. А. Ковды. Москва. 1971. 90 с.
7. Pitt M.A. Molybdenum toxicity, interactions between copper, molybdenum and sulphate, Agents a. Actions. 1976. v. 6, p. 758.
8. Масуренков Ю.П. Кайнозойский вулканизм Эльбрусской вулканической области. М.: Изд. АН СССР. 1961. 85 с.
9. Лебедев В.А., Чернышев И.В., Чугаев А.В., Гольцман Ю.В., Баирова Э.Д. Геохронология извержений и источники вещества материнских магм вулкана Эльбрус (Большой Кавказ): результаты К-Ag и Sr-Nd-Pb изотопных исследований // Геохимия. 2010. № 1. С. 45-73.
10. Богатиков О.А., Мелекесцев И.В., Гурбанов А.Г. и др. Радиоуглеродное датирование голоценовых извержений вулкана Эльбрус (Северный Кавказ, Россия) // Доклады РАН. 1998. Т. 363, № 2. С. 219-221.
11. Виноградов А.П. Биогеохимические провинции и их роль в органической эволюции // Геохимия. 1963, № 3. С. 12-18.

DOI: 10.34708/GSTOU.CONF..2021.14.59.029
УДК 699.841

К РАСЧЕТУ ОПТИМАЛЬНОЙ СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДЕНИЯ ЗДАНИЯ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

TO CALCULATION OF THE OPTIMAL DEGREE OF DAMAGE TO A BUILDING BY SEISMIC IMPACT

¹Абакаров А.Д., ²Курбанов И.Б., ³Гасанов Р.Г.
¹Abakarov A.D., ²Kurbanov I.B., ³Gasarov R.G.

¹Доктор технических наук, профессор кафедры «Архитектура» ДГТУ, г. Махачкала, Россия

²Генеральный директор ООО «Жилстройинвест», г. Махачкала, Россия

³Старший преподаватель кафедры «Архитектура» ДГТУ, г. Махачкала, Россия

¹Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture, DSTU,
Makhachkala, Russia

²General Director of Zhilstroyinvest LLC, Makhachkala, Russia

³Senior lecturer of the Department of Architecture, DSTU, Makhachkala, Russia

Аннотация. Дана постановка задачи по расчету оптимальной степени повреждения здания при сейсмическом воздействии. Условие оптимизационного расчета записано в виде вероятностно-экономической целевой функции, где начальные затраты на антисейсмическое усиление здания уравниваются с вероятностями потерями, связанными с наступлением той или иной степени повреждения здания. Вероятность безотказности здания, соответствующая данному уравновешенному состоянию, названа оптимальной надежностью, а степень повреждения – оптимальной степенью повреждения. Всего в соответствии со шкалой MSK-64 рассмотрены 5 степеней повреждения. Последовательности переходов из одних состояний повреждения в другие представлены в виде простейшего Марковского потока с непрерывным временем и дискретными состояниями. Составлены дифференциальные уравнения процесса переходов и представлены их общие решения. В случае если последствия наступления

определенной степени повреждения здания носят как экономический, так и неэкономический характер, предложено, исходя из зависимости расчета экономических потерь и затрат от повышения надежности до высоких уровней и показателя нормативного уровня надежности здания, определенного по предлагаемому в литературе выражению, принять решения о допустимой степени повреждения здания.

Abstract. The problem statement is given for calculating the optimal degree of damage to a building under seismic impact. The condition of the optimization calculation is written in the form of a probabilistic-economic objective function, where the initial costs for antiseismic strengthening of the building are balanced with the probabilistic losses associated with the onset of one or another degree of damage to the building. The probability of a building's reliability, corresponding to a given balanced state, is called the optimal reliability, and the degree of damage is called the optimal degree of damage. In total, in accordance with the MSK-64 scale, 5 degrees of damage are considered. Sequences of transitions from one damage state to another are presented in the form of the simplest Markov flow with continuous time and discrete states. Differential equations of the transition process are compiled and their general solutions are presented. If the consequences of the onset of a certain degree of damage to the building are both economic and non-economic in nature, it is proposed, based on the dependence of the calculation of economic losses and costs from increasing reliability to high levels and the indicator of the standard level of building reliability, determined according to the expression proposed in the literature, to make decisions on permissible degree of damage to the building.

Ключевые слова: сейсмические воздействия, степени повреждения здания, вероятностно-экономический критерий оптимизационного расчета, марковский поток последовательностей переходов, дифференциальные уравнения вероятностей состояний, оптимальная надежность, оптимальная степень повреждения, допустимая степень повреждения.

Keywords: seismic impacts, the degree of damage to the building, the probabilistic-economic criterion of the optimization calculation, the Markov flow of transition sequences, the differential equations of the probabilities of states, the optimal reliability, the optimal degree of damage, the admissible degree of damage.

В зданиях и сооружениях, поврежденных землетрясениями, предельными считаются состояния, соответствующие определенным уровням повреждения, не приводящим к разрушению конструкций и в целом зданий и сооружений. В шкале сейсмической интенсивности MSK-64 предусмотрена следующая классификация повреждений:

1 степень. Легкие повреждения: тонкие трещины в штукатурке и небольших кусков штукатурки.

2 степень. Умеренные повреждения: небольшие трещины в стенах, откалывание довольно больших кусков штукатурки, падение кровельных черепиц, трещины в дымовых трубах, падение частей дымовых труб.

3 степень. Тяжелые повреждения: большие и глубокие трещины в стенах, падение дымовых труб.

4 степень. Разрушения: сквозные трещины и проломы в стенах, обрушение частей зданий, обрушение внутренних стен и стен заполнения каркаса.

5 степень. Обвал: Полное разрушение зданий.

Аналогичная классификация дана и в Европейской макросейсмической шкале EMS-98. Здесь считается, что сооружения, рассчитанные на землетрясения высокой интенсивности, должны выдерживать повреждения несущих конструкций без потери конструктивной целостности и устойчивости. Для этого повреждения конструкций должны быть не более 2-й (умеренные повреждения) и 3-й (сильные повреждения). 2-я степень повреждения — это трещины в колоннах, балках каркаса и несущих стенах, а 3-я степень повреждения — трещины в колоннах и узлах соединения ригелей со стойками каркаса и в стыках связанных стен, повреждения защитного слоя бетона, изгиб стержней арматуры.

В существующих нормах строительства в сейсмических районах [1] допустимая степень повреждения несущих конструкций регулируется коэффициентом K_1 , который принимается в

зависимости от строительной и конструктивной системы здания в пределах от 0,2 до 0,35. Снижая сейсмические нагрузки, определенные для случая упругой работы конструкций, на величину K_1 , находят расчетные сейсмические нагрузки, соответствующие допустимому поврежденному состоянию здания.

В настоящей работе предлагается оптимальную или допустимую степень повреждения зданий и сооружений определить путем их оптимизационного расчета с использованием вероятностно-экономического критерия.

Целевую функцию оптимизационного расчета представим в виде суммы начальных затрат на антисейсмическое усиление и вероятностных экономических потерь при землетрясениях [2,3]. С учетом возможности разных степеней повреждения здания с тем или иным уровнем дефицита сейсмостойкости, условие оптимизационного расчета на сейсмические воздействия без учета коэффициента, учитывающего отдаленность потерь и затрат связанных с повреждением конструкций, представим в виде:

$$C = C_0 + \sum_{k=0}^r C_k^* \sum_{j=1}^m P_j P_{kj} - \min_k, \quad (1)$$

где C - суммарные ожидаемые потери связанные с сейсмической опасностью; C_0 - начальные затраты на антисейсмическое усиление здания; k - номер степени повреждения здания, например, по шкале MSK-64; C_k^* - приведенный к единовременному суммарный ущерб при k -той степени повреждения здания; m - число ожидаемых сильных землетрясений за срок службы здания; P_j - вероятность наступления j -го землетрясения; P_{kj} - вероятность нахождения здания в состоянии k -й степени повреждения при воздействии j -го землетрясения. r - число степеней повреждения (по шкале MSK-64 $r=5$).

По окончании j -го землетрясения здание будет находиться только в одном из рассматриваемых состояний повреждения, поэтому:

$$\sum_{k=0}^r P_{kj} = 1, \quad (2)$$

Поиск минимума функции (1) по оптимизируемым параметрам конструкций приводит к уравниванию начальных затрат на усиление с возможными в будущем потерями и установлению соответствующего этому уравновешенному состоянию уровня надежности здания, называемого оптимальным. Оптимальная надежность при $r = 5$ можно будет оценить в виде:

$$P_{\text{опт}} = 1 - \sum_{k=0}^5 \sum_{j=1}^m P_j \bar{P}_{kj}, \quad (3)$$

где $\bar{P}_{kj}$ - вероятность k -й степени повреждения здания при выполнении условия минимума функции (1).

Далее фиксируется степень повреждения, соответствующая $P_{\text{опт}}$, которую также можно назвать оптимальной.

Для определения вероятностей степеней повреждения сооружения, последовательности переходов из одних состояний повреждения в другие можно представить в виде простейшего Марковского потока с непрерывным временем и дискретными состояниями, удовлетворяющего условиям ординарности и отсутствия последствия [4]. Это значит, что переход системы в последующую степень повреждения будет зависеть от степени повреждения, в которой находится система в данный момент времени, и за бесконечно малый промежуток времени система может перейти только в одно последующее состояние повреждения.

Уравнения процесса переходов при этом записываются так:

$$\frac{dP_{kj}(t)}{dt} = P_{k-1,j}(t)\lambda_{k-1,j}(t) - P_{kj}(t)\lambda_{kj}(t). \quad (4)$$

Здесь: $k=1,2, \dots, r-1$; $j=1,2, \dots, m$; $P_k(0)=0$; $P_0(0)=1$.

В уравнении (4) $\lambda_{kj}(t)$ является интенсивностью перехода системы из k -го состояния в $k+1$ состояние повреждения при j -том землетрясении. Она определяется как вероятность превышения в единицу времени предельного уровня сейсмической реакции, соответствующего k -му состоянию повреждения. При этом для железобетонных конструкций эти уровни могут быть определены как соответствующие падению определенной части жесткости системы, а для металлических конструкций – как соответствующие определенным остаточным деформациям в вертикальных несущих конструкциях.

Общее решение уравнений (4) имеет вид [4]:

$$P_{kj}(t) = -\exp \left(- \int_0^t \lambda_{kj}(\tau_1) d\tau_1 \left[\int_0^{\tau_1} \lambda_{k-1,j}(\tau_1) \exp \left(\int_0^{\tau_1} \lambda_{kj}(\tau_2) d\tau_2 \right) P_{k-1,j}(\tau_1) d\tau_1 \right] \right).$$

Вероятность того, что здание при j -том землетрясении останется в начальном неповрежденном состоянии, находим так:

$$P_{0j}(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda_{0j}(\tau) d\tau \right],$$

где $\lambda_{0j}(t)$ – интенсивность перехода системы из неповрежденного состояния в состояние повреждения.

Вышеприведенный подход соответствует случаю, когда рассматриваемые степени повреждения сооружения приводят только к экономическим потерям.

В большинстве случаев не все ущербы от землетрясений можно оценить экономически, например, гибель и травматизм людей. Но и в этом случае, если ставить задачу по наилучшему использованию имеющихся ресурсов для обеспечения максимально возможной безопасности по всей массе объектов неэкономической ответственности, вероятностно-экономический критерий оптимизационного расчета не теряет своей привлекательности [5].

В литературе, как было отмечено, предложены разные подходы по применению критерия вероятностной оптимизации в расчетах зданий с неэкономическими последствиями отказа. Общее в них заключается в том, что каждое государство затраты на снижение риска в той или иной мере должно сбалансировать с другими необходимыми расходами. Это задача принятия решения в условиях риска. Главное – дать правильную информацию для «лица, принимающего решение».

Мы предлагаем в начале по критерию (1) найти оптимальное решение с учетом только экономических последствий отказа, например, считая, что время землетрясения было прогнозировано и люди успели покинуть здание. Полученный при этом оптимальный уровень надежности $P_{\text{опт}}$ будет первым ключевым показателем для принятия решения. Затем, постепенно наращивая объемы экономического ущерба до больших величин, получаем табличные значения и строим графическую зависимость $P_{\text{опт}}$ от уровня относительного сейсмического риска, оцениваемого в виде:

$$C_r = \sum_{k=1}^r C_k^* \sum_{j=1}^m P_j \bar{P}_{kj} / \bar{C}_0.$$

Вид данного графика показан на рис. 1.

Далее так же получаем табличные значения и строим графическую зависимость оптимальных начальных затрат $\bar{C}_0$ на антисейсмическое усиление от уровня оптимальной надежности здания (см. рис. 2).

Рис. 1. График оптимальной надежности здания в зависимости от уровня относительного сейсмического риска здания

В качестве второго ключевого показателя для принятия решения можно принять величину надежности, получаемую по выражению (5), предложенного в литературе для нормирования надежности зданий и сооружений с неэкономическими последствиями отказа [6]:

$$R = 1 - \frac{10^{-5} \xi_s T}{L}, \quad (5)$$

где ξ_s - коэффициент социальной значимости, $\xi_s = 0,05$ для жилых, общественных и промышленных зданий; T - расчетный срок службы здания; L - среднее число людей, находящихся внутри здания.

Рис. 2. График стоимости начальных затрат на антисейсмическое усиление, соответствующие уровням оптимальной надежности здания

Таким образом, мы получаем две ключевые информации по нормированию надежности здания. Далее «лицо принимающее решение», исходя из влияния уровня надежности здания на затраты на антисейсмическое усиление и на экономические и неэкономические показатели сейсмического риска, принимает решение о приемлемой величине надежности здания. В последующем разделив здания и сооружения на определенные классы по степени ответственности, можно нормировать их уровни надежности и допустимые степени повреждения.

Список использованной литературы

1. Свод правил СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах» - М.: Стандартинформ, 2018. – 115 с.
2. Ржаницын, А.Р. Основные положения вероятностной экономической методики расчета строительных конструкций/ А.Р. Ржаницын, Б.И. Снаркис, Ю.Д. Сухов // Строительная механика и расчет сооружений – 1979. – №3. – с. 67-71.
3. Абакаров, А.Д. К определению оптимальной надежности сооружений, проектируемых для строительства в сейсмических районах/ А.Д. Абакаров// Строительная механика и расчет сооружений. – 1988. - №6 – с. 57-61.
4. Тихонов, В.И. Марковские случайные процессы/ В.И. Тихонов, М.А. Миронов. – М.: Совет радио, 1977. – 485 с.
5. Райзер, В.Д. Вероятностные методы в анализе надежности и живучести сооружений/ В.Д. Райзер – М.: Издательство АСВ, 2018. – 396 с.
6. Аугусти, Г. Вероятностные методы в строительном проектировании / Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Кашиати. – М.: Стройиздат, 1988. – 584 с.