ОЦЕНКА ДЕФИЦИТА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ КИРПИЧНОЙ ДЫМОВОЙ ТРУБЫ В
СООТВЕТВИИ С АКТУАЛЬНЫМИ НОРМАМИ ПРОЕКТИРОВАНИЯАбаев¹ З. К., Кодзаев² М. Ю., Валиев³ А. Д.^{1,2,3} Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет).

362021, г. Владикавказ, ул. Николаева 44

e-mail: ¹abaich@yandex.ru, ²m_kodzaev@mail.ru, ³azamat99valiev@gmail.com

Аннотация. Большинство кирпичных дымовых труб, расположенных в сейсмоопасных регионах было построено задолго до принятия актуальных норм проектирования. В настоящей статье представлен последовательный пример оценки дефицита сейсмостойкости кирпичной дымовой трубы и даны общие выводы относительно изменений основных коэффициентов регулирующих норм. *Цель исследования:* количественная оценка дефицита сейсмостойкости дымовой трубы в соответствии с актуальными нормами проектирования СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*».

Объект исследования: кирпичная дымовая труба высотой 45 м.

Предмет исследования: методика расчета зданий и сооружений на сейсмическое воздействие; методика количественной оценки дефицита сейсмостойкости зданий и сооружений.

Материалы и методы: расчет производился в соответствии с линейно-спектральной теорией. Определялись собственные частоты и периоды колебаний, коэффициент динамичности, расчетные сейсмические сил и изгибающие моменты для трех форм свободных колебаний.

Результаты: собственные частоты колебаний рассматриваемого сооружения составили, для первых трех форм колебаний, соответственно: $\omega_1 = 2,94 \text{ с}^{-1}$, $\omega_2 = 14,14 \text{ с}^{-1}$, $\omega_3 = 44,72 \text{ с}^{-1}$; периоды колебаний: $T_1 = 2,12 \text{ с}$, $T_2 = 0,44 \text{ с}$, $T_3 = 0,14 \text{ с}$. Максимальное значение (по модулю) сейсмических сил по старым нормам (СНиП) – 163 кН, по новым (СП) – 186,3 кН. Суммарное значение максимального изгибающего момента по СНиП – 11124,7 кН, по СП – 15284,8 кН.

Выводы: а) изменился K_1 – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения. По СНиП – $K_1 = 0,35$, а по СП – $K_1 = 0,4$ для данного типа сооружений; б) В СП появился дополнительный коэффициент при определении значения сейсмической нагрузки K_0 – коэффициент, учитывающий назначение сооружения; в) в расчете значения сейсмической нагрузки по СНиП участвует матрица нагрузок в кН $[Q]$, а в матрица масс $[m]$, при точном расчете, это увеличивает запас прочности по новому СП; г) изменился способ расчета коэффициентов β_i . Полученные по СП, больше полученных по СНиП приблизительно на 20 %; д) отличие суммарного отклика сооружения (расчетных изгибающих моментов) составляет в среднем 27,4 %.

Ключевые слова: сейсмостойкость, сейсмическая опасность, линейно-спектральный метод, кирпичная дымовая труба

ВВЕДЕНИЕ

Дымовые трубы являются одним из наиболее ответственных типов инженерных сооружений большинства промышленных предприятий и производственных объектов городской инфраструктуры. Особое место среди них занимают кирпичные дымовые трубы нормативный срок службы которых может достигать 100 лет; диапазон высот от 30 до 80 м, а также относительная дешевизна и простота конструкции обусловили их широкое применение в условиях городской застройки [1]. Однако высокий уровень повреждаемости кирпичных дымовых труб, постоянные коррозионные и динамические ветровые воздействия требуют от инженеров технически грамотной эксплуатации и оценки их остаточного ресурса [2].

Особое беспокойство в среде как отечественных, так и зарубежных исследователей вызывает сейсмостойкость подобных сооружений [2–9]. Следует отметить, что большинство кирпичных

дымовых труб расположенных в сейсмоопасных регионах было построено задолго до принятия актуальных норм проектирования, благодаря чему они могут представлять серьезную опасность для жизни и здоровья людей, а также устойчивого функционирования и развития городской инфраструктуры в целом. Помимо этого, в случае реконструкции или капитального ремонта все построенные ранее трубы должны удовлетворять актуальным нормам. В связи с этим, актуальной становится задача количественной оценки имеющегося дефицита сейсмостойкости кирпичных дымовых труб.

Целью настоящего исследования является количественная оценка дефицита сейсмостойкости кирпичной дымовой трубы в соответствии с актуальными нормами проектирования СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*».

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

В работах [3–9] приводятся результаты детального анализа конструктивных особенностей и специфики повреждения кирпичных дымовых труб, статистическая оценка их повреждаемости и моделирование сейсмического воздействия на напряженно-деформированное состояние трубы. Данные работы, решая крайне важные и практически ценные вопросы, такие как использование модального Pushover-анализа и прямого динамического метода в задачах оценки сейсмического риска [3–4], изменения параметров динамической модели для уменьшения сейсмического воздействия [5–6], а также разработка методов усиления и повышения несущей

способности кладки труб [7–9], не дают, тем не менее, каких-либо рекомендаций относительно методики оценки дефицита сейсмостойкости кирпичных дымовых труб и применения ее результатов в практике обеспечения их конструктивной надежности и соответствия актуальным нормам проектирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования настоящей работы является кирпичная дымовая труба высотой 45 м (см. рис. 1).

Рис. 1. Объект исследования (труба дымовая кирпичная $h = 45$ м)

Fig. 1. Object of study (brick masonry chimney $h = 45$ m)

Методы. Расчет производится в соответствии с линейно-спектральной теорией, используемой в отечественных нормах и широко освещенной в научно-технической литературе [10–14]. Данный метод расчёта основан на разложении системы дифференциальных уравнений движений по собственным формам и включает в себя следующие этапы:

- составление динамической расчётной схемы;
- модальный анализ выбранной расчётной схемы;
- определение модальных (т.е. соответствующих каждой из собственных форм) инерционных сейсмических нагрузок;
- приложение модальных инерционных нагрузок к расчётной схеме статически и определение модальных откликов конструкции (определение перемещений, внутренних усилий);
- вычисление суммарного (расчётного) сейсмического отклика, суммируя соответствующие модальные отклики по специальным формулам;
- оценка сейсмостойкости конструкции по суммарному отклику [12].

Сбор нагрузок

Поперечное сечение трубы – усеченный конус.

Материал – кирпичная кладка марки М250 и раствора марки 200.

Объем кирпичной кладки для усеченного конуса определяют по формуле.

$$V = \pi h((R^2 + Rr + r^2) - (R'^2 + R'r' + r'^2))/3, \quad (1)$$

где V – объем кирпичной кладки,

h – высота уровня,

R – радиус нижнего сечения до наружной поверхности трубы,

r – радиус верхнего сечения до наружной поверхности трубы,

R' – радиус нижнего сечения до внутренней поверхности трубы,

r' – радиус верхнего сечения до внутренней поверхности трубы.

Разобьем трубу по высоте на отдельные 5 уровней с одинаковой толщиной стенок. Схемы всех ярусов и определение расчетных нагрузок представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сбор нагрузок

Table 1. Loads calculation

Схема яруса [Tier scheme]	Расчеты [Calculation]
<p>Ярус 1 [Tier 1]</p>	<p> $h = 4 \text{ м},$ $R = 2,265 \text{ м},$ $r = 2,215 \text{ м},$ $R' = 1,765 \text{ м},$ $r' = 1,6 \text{ м}.$ $V_1 = 314 \cdot 4((2,265^2 + 2,265 \cdot 2,15 + 2,15^2) - (1,765^2 + 1,765 \cdot 1,6 + 1,6^2))/3 = 25,62 \text{ м}^3,$ $Q_1 = \rho_{\text{кирп}} V = 18 \cdot 25,16 = 461,16 \text{ кН},$ где $\rho_{\text{кирп}} = 18 \text{ кН/м}^3$ – плотность кирпича. </p>
<p>Ярус 2 [Tier 2]</p>	<p> $h = 17 \text{ м},$ $R = 2,77 \text{ м},$ $r = 2,265 \text{ м},$ $R' = 2,4 \text{ м},$ $r' = 1,895 \text{ м}.$ $V_2 = 314 \cdot 17((2,77^2 + 2,77 \cdot 2,265 + 2,265^2) - (2,4^2 + 2,4 \cdot 1,895 + 1,895^2))/3 = 92,3 \text{ м}^3,$ $Q_2 = 92,3 \cdot 18 = 1661,4 \text{ кН}.$ </p>

Продолжение таблицы 1
Table 1 continued

<p>Ярус 3 [Tier 3]</p>	<p> $h = 6 \text{ м,}$ $R = 2,945 \text{ м,}$ $r = 2,77 \text{ м,}$ $R' = 2,445 \text{ м,}$ $r' = 2,27 \text{ м.}$ $V_3 = 314 \cdot 6((2,945^2 + 2,945 \cdot 2,77 + 2,77^2) - (2,445^2 + 2,445 \cdot 2,27 + 2,27^2))/3 = 49,1 \text{ м}^3,$ $Q_3 = 49,1 \cdot 18 = 884,4 \text{ кН.}$ </p>
<p>Ярус 4 [Tier 4]</p>	<p> $h = 8 \text{ м,}$ $R = 3,18 \text{ м,}$ $r = 2,945 \text{ м,}$ $R' = 2,55 \text{ м,}$ $r' = 2,315 \text{ м.}$ $V_4 = 314 \cdot 8((3,18^2 + 3,18 \cdot 2,945 + 2,945^2) - (2,55^2 + 2,55 \cdot 2,315 + 2,315^2))/3 = 87 \text{ м}^3,$ $Q_4 = 87 \cdot 18 = 1570 \text{ кН.}$ </p>
<p>Ярус 5 [Tier 5]</p>	<p> $h = 10 \text{ м,}$ $R = 3,475 \text{ м,}$ $r = 3,18 \text{ м,}$ $R' = 2,715 \text{ м,}$ $r' = 2,42 \text{ м.}$ $V_5 = 314 \cdot 10((3,475^2 + 3,475 \cdot 3,18 + 3,18^2) - (2,715^2 + 2,715 \cdot 2,42 + 2,42^2))/3 = 140,65 \text{ м}^3,$ $Q_5 = 140,65 \cdot 18 = 2531,7 \text{ кН.}$ </p>

Составление динамической расчётной схемы

С целью уменьшения трудоемкости расчета примем расчетную схему с тремя сосредоточенными массами в местах характерного изменения сечения трубы (см. рис. 2):

$$m_1 = Q_1 + 6,5/17Q_2 = 1097 \text{ кН},$$

$$m_2 = 11,5/17Q_2 + Q_3 + 1/8Q_4 = 2205 \text{ кН},$$

$$m_3 = 7/8Q_4 + 1/2Q_5 = 2640 \text{ кН}.$$

Рис. 2. Расчетная схема

Fig. 2. Designed model

Жесткость сечения трубы определяется по формуле:

$$EI = 5,76 \cdot 10^6 \cdot 63,78 = 36,7 \cdot 10^7 \text{ кН} \cdot \text{м}^2, \quad (2)$$

где I – момент инерции сечения (принимается по максимальному диаметру – см. рис. 3),

$$I = (\pi d^4) / 64 = (3,14(6,95^4 - 5,67^4)) / 64 = 63,78 \text{ м}^4$$

Рис. 3. Сечение дымовой трубы

Fig. 3. Cross-section of the chimney

E – модуль упругости кладки трубы согласно СП¹:

$$E = 0,8E_0 = 0,8 \cdot 7200 = 5760 \text{ МПа}.$$

E_0 – начальный модуль упругости для кирпичной кладки:

$$E_0 = \alpha R_u = 7,2 \cdot 1000 = 7200 \text{ МПа},$$

где α – упругая характеристика кладки,

R_u – временное сопротивление сжатию кладки.

Временное сопротивление определяют:

$$R_u = kR = 2 \cdot 3,6 = 7,2 \text{ МПа},$$

где k – коэффициент, принимаемый по табл. 14 [2],

R – Расчетное сопротивление кирпича (марки М250 и раствора марки 200).

Модальный анализ выбранной расчётной схемы

Определяем динамические характеристики модели по формуле:

$$([D] \cdot [M] - \lambda[E]) = [0], \quad (3)$$

¹ СП 427.1325800.2018 Каменные и армокаменные конструкции. Методы усиления.

где $[M]$ – матрица масс,

$$[M] = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1097 & 0 & 0 \\ 0 & 2205 & 0 \\ 0 & 0 & 2640 \end{pmatrix};$$

$[D]$ – матрица податливости:

$$[D] = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{pmatrix} = 10^{-6} \begin{pmatrix} 82,7 & 29 & 5,67 \\ 29 & 12,55 & 2,81 \\ 5,67 & 2,81 & 0,907 \end{pmatrix},$$

где δ_{ij} – перемещение точки j от воздействия единичного усилия в точке i (см. рис. 4):

$$\delta_{11} = (45 \cdot 45 \cdot 1 / 2 \cdot 2 / 3 \cdot 45) / EI = 30375 / EI,$$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = (24 \cdot 24 \cdot 1 / 2 \cdot 37 / 45 \cdot 45) / EI = 10656 / EI,$$

$$\delta_{13} = \delta_{31} = (10 \cdot 10 \cdot 1 / 2 \cdot 41,67 / 45 \cdot 45) / EI = 2083,5 / EI,$$

$$\delta_{22} = (24 \cdot 24 \cdot 1 / 2 \cdot 2 / 3 \cdot 24) / EI = 4608 / EI,$$

$$\delta_{23} = \delta_{32} = (10 \cdot 10 \cdot 1 / 2 \cdot 20,67 / 24 \cdot 24) / EI = 1033,5 / EI,$$

$$\delta_{33} = (10 \cdot 10 \cdot 1 / 2 \cdot 2 / 3 \cdot 10) / EI = 333 / EI;$$

Рис. 4. Единичные эпюры ($P = 1$ кН)

Fig. 4. Unit diagrams ($P = 1$ kN)

$[E]$ – единичная матрица.

$$[E] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Периоды колебания сооружения:

$$T_0 = 2\pi / \omega_i, \quad (4)$$

где ω_i – собственные частоты сооружения:

$$\omega_i = \sqrt{1 / \lambda_i}, \quad (5)$$

где λ_i – собственные значения матрицы:

$$([D] \cdot [M] - \lambda[E]) = \begin{pmatrix} 0,0907 - \lambda & 0,0639 & 0,0149 \\ 0,03181 & 0,0276 - \lambda & 0,0074 \\ 0,0062 & 0,0061 & 0,00239 - \lambda \end{pmatrix} = [0]. \quad (6)$$

Раскрытие определителя матрицы 6 по правилу треугольников:
 $(0,0907 - \lambda)(0,0276 - \lambda)(0,0239 - \lambda) + 0,0639 \cdot 0,0074 \cdot 0,0149 + 0,03181 \cdot 0,0061 \cdot 0,062 - (0,0276 - \lambda) \cdot 0,0062 \cdot 0,0149 - (0,0907 - \lambda) \cdot 0,0639 \cdot 0,03181 - (0,00239 - \lambda) \cdot 0,0074 \cdot 0,0061 = -\lambda^3 + 0,12069\lambda^2 - 0,000616\lambda.$ (7)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Решая уравнение 7, находим:

$$\lambda_1 = 0,0005; \lambda_2 = 0,005; \lambda_3 = 0,115.$$

Определение собственных частот и периодов колебаний представлены в таблице 2.

Таблица 2. Собственные частоты и периоды колебания
Table 2. Natural frequencies and vibration periods

Собственные частоты колебаний, c^{-1}	Периоды колебаний, c
$\omega_0 = \sqrt{1/\lambda_i}$	$T_0 = 2\pi / \omega_i$
$\omega_1 = \sqrt{1/0,115} = 2,94$	$T_1 = 2 \cdot 3,14 / 2,94 = 2,12$
$\omega_2 = \sqrt{1/0,005} = 14,14$	$T_2 = 2 \cdot 3,14 / 14,14 = 0,44$
$\omega_3 = \sqrt{1/0,0005} = 44,72$	$T_3 = 2 \cdot 3,14 / 44,72 = 0,14$

Собственные векторы матрицы 6:

$$u_1 = \begin{bmatrix} -0,16493 \\ -0,466 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad u_2 = \begin{bmatrix} 0,43215 \\ -0,81849 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad u_3 = \begin{bmatrix} 0,07478 \\ 0,36875 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Для наглядности расчет и сравнение сейсмических сил, действующих на расчетную схему, проведем в таблице 3.

Таблица 3. Определение расчетных сейсмических сил
Table 3. Calculation of seismic forces

Расчет по СНиП II-7-81*	Расчет по СП 14.13330.2018
Расчетная сейсмическая нагрузка в выбранном направлении:	
$S_{ik} = K_1 S_{0ik}$	$S_{ik}^j = K_0 K_1 S_{0ik}^j$
K_1 – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения (табл. 3) = 0,35	$K_0 = 1$ – коэффициент, учитывающий назначение сооружения и его ответственность (табл. 4.2) K_1 – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения (табл. 5.2) = 0,4
S_{0ik} – значение сейсмической нагрузки для i - го тона собственных колебаний $S_{0ik} = [Q_k] A \beta_i K_\psi [\eta_{ik}]$	S_{0ik}^j – значение сейсмической нагрузки для i - го тона собственных колебаний $S_{0ik}^j = [m_k^j] A \beta_i K_\psi [\eta_{ik}^j]$

Продолжение таблицы 3
Table 3 continued

$[Q_k]$ – матрица веса сооружения, отнесенный к точке k	$[m_k^j]$ – матрица масс здания или моментов инерций соответствующего массе здания, отнесенные к точке k
A – относительное ускорение, равное отношению сейсмических ускорений грунта к ускорению свободного падения. $A = 0,2$ (Для сейсмичности района в 8 баллов по шкале MSK-64)	A – значение ускорения в уровне основания $A = 2 \text{ м/с}^2$ (для районов с расчетной сейсмичностью 8 баллов)
K_ψ – коэффициент, принимаемый по табл. 6 $K_\psi = 1,5$	K_ψ – коэффициент, принимаемый по табл. 5.3 $K_\psi = 1,5$
$[\eta_{ik}^j]$ – коэффициент, зависящий от формы деформации сооружения при собственных колебаниях i -й формы (п 5.7; 5.8) $[\eta_{ik}^j] = \frac{\left[X_i(x_k) \sum_{j=1}^n m_j X_i(x_j) \right]}{\left[\sum_{j=1}^n m_j X_i^2(x_j) \right]} = \begin{pmatrix} 0,112 & 0,567 & 0,321 \\ 0,551 & -0,266 & 0,715 \\ 1,494 & 0,095 & -0,588 \end{pmatrix}$	
Коэффициент β_i для грунтов 1 группы при $T_1 = 2,12$	
β_i – коэффициент динамичности, соответствующий i -й форме колебаний, принимаем п. 2.6 $\beta_1 = \frac{0,7}{T_1} = \frac{0,7}{2,12} = 0,33$, но не менее 0,8 Принимаем $\beta_1 = 0,8$	β_i – коэффициент динамичности, соответствующий i -й форме колебаний, принимаем п. 5.6 $\beta_1 = 2,5 \sqrt{\frac{0,4}{T_i}} = 2,5 \sqrt{\frac{0,4}{2,12}} = 1,08$
Коэффициент β_i для грунтов 1 группы при $T = 0,44$	
При $(0,08 \text{ с} < T_i < 0,384 \text{ с})$ $\beta_2 = 2,2$	При $(0,1 \text{ с} < T_i < 0,4 \text{ с})$ $\beta_2 = 2,5$
Коэффициент β_i для грунтов 1 группы при $T_3 = 0,14$	
$\beta_3 = 2,2$	$\beta_3 = 2,5$
Вычислим значение сейсмической нагрузки S_{ik} с коэффициентами β_i	
$S_{ik} = K_1 [Q_k] A \beta_i K_\psi [\eta_{ik}^j]$ $S_1 = 0,35 \cdot \begin{pmatrix} 1097 & 0 & 0 \\ 0 & 2205 & 0 \\ 0 & 0 & 2640 \end{pmatrix} \cdot 0,2 \cdot 1,5 \cdot \beta_1 \cdot \begin{bmatrix} 0,112 \\ 0,551 \\ 1,494 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} S_{11}^{расч} \\ S_{21}^{расч} \\ S_{31}^{расч} \end{bmatrix} = \beta_1 \cdot \begin{bmatrix} 12,9 \\ 127,5 \\ 414,1 \end{bmatrix}$	$S_{ik}^j = K_0 K_1 [m_k^j] A \beta_i K_\psi [\eta_{ik}^j]$ $S_1 = 1 \cdot 0,35 \cdot \begin{pmatrix} 109,7 & 0 & 0 \\ 0 & 220,5 & 0 \\ 0 & 0 & 264 \end{pmatrix} \cdot 2 \cdot 1,5 \cdot \beta_1 \cdot \begin{bmatrix} 0,112 \\ 0,551 \\ 1,494 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} S_{11}^{расч} \\ S_{21}^{расч} \\ S_{31}^{расч} \end{bmatrix} = \beta_1 \cdot \begin{bmatrix} 14,7 \\ 145,7 \\ 473,2 \end{bmatrix}$
$S_2 = 0,35 \cdot \begin{pmatrix} 1097 & 0 & 0 \\ 0 & 2205 & 0 \\ 0 & 0 & 2640 \end{pmatrix} \cdot 0,2 \cdot 1,5 \beta_2 \cdot \begin{bmatrix} 0,567 \\ -0,266 \\ 0,095 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} S_{12}^{расч} \\ S_{22}^{расч} \\ S_{32}^{расч} \end{bmatrix} = \beta_2 \cdot \begin{bmatrix} 65,3 \\ -59,7 \\ -26,3 \end{bmatrix}$	$S_2 = 0,4 \cdot \begin{pmatrix} 109,7 & 0 & 0 \\ 0 & 220,5 & 0 \\ 0 & 0 & 264 \end{pmatrix} \cdot 2 \cdot 1,5 \beta_2 \cdot \begin{bmatrix} 0,567 \\ -0,266 \\ 0,095 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} S_{12}^{расч} \\ S_{22}^{расч} \\ S_{32}^{расч} \end{bmatrix} = \beta_2 \cdot \begin{bmatrix} 74,6 \\ -66,2 \\ -30 \end{bmatrix}$

Продолжение таблицы 3

Table 3 continued

$S_3 = 0,35 \cdot \begin{pmatrix} 1097 & 0 & 0 \\ 0 & 2205 & 0 \\ 0 & 0 & 2640 \end{pmatrix} \cdot 0,2 \cdot 1,5 \cdot \beta_3 \cdot \begin{bmatrix} 0,321 \\ 0,715 \\ -0,588 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} S_{13}^{расч} \\ S_{23}^{расч} \\ S_{33}^{расч} \end{bmatrix} = \beta_3 \cdot \begin{bmatrix} 36,9 \\ 165,5 \\ -163 \end{bmatrix}$	$S_3 = 0,4 \cdot \begin{pmatrix} 109,7 & 0 & 0 \\ 0 & 220,5 & 0 \\ 0 & 0 & 264 \end{pmatrix} \cdot 2 \cdot 1,5 \cdot \beta_3 \cdot \begin{bmatrix} 0,321 \\ 0,715 \\ -0,588 \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} S_{13}^{расч} \\ S_{23}^{расч} \\ S_{33}^{расч} \end{bmatrix} = \beta_3 \cdot \begin{bmatrix} 41,1 \\ 189,1 \\ -186,3 \end{bmatrix}$
--	--

ВЫВОДЫ

В таблице 4 представлено сравнение коэффициентов динамичности.

Таблица 4. Сравнение коэффициентов динамичности

Table 4. Comparison between dynamic coefficients

Категория грунта	Значение периода, с	β_i по СНиП	β_i по СП	Превышение β_i по СП над β_i по СНиП, %
I категория грунта	2,12	0,8	1,08	35
	0,44	2,2	2,5	13,6
	0,14	2,2	2,5	13,6

Анализ данных, представленных в таблице 4, позволяет судить о значительном увеличении коэффициентов динамичности (в среднем на 20 %). Особенно значительно изменение коэффициента для первой формы колебания – на 35 %.

Определим суммарный изгибающий момент в основании трубы по формуле «ККСК» – квадратный корень из суммы квадратов:

$$M_i^{сум} = \sqrt{(M_{i1})^2 + (M_{i2})^2 + (M_{i3})^2} \quad (8)$$

Расчет изгибающих моментов приведен в таблице 5.

Таблица 5. Определение изгибающих моментов

Table 5. Calculation of bending moments

Расчеты по СНиП II-7-81*	Расчеты по СП 14.13330.2018
В соответствии с таблицей 1, сейсмические силы определяем	
$\beta_1 = 0,8$ $0,8 \cdot \begin{bmatrix} 12,9 \\ 127,5 \\ 414,1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10,3 \\ 102 \\ 331,3 \end{bmatrix}$	$\beta_1 = 1,08$ $1,08 \cdot \begin{bmatrix} 14,7 \\ 145,7 \\ 473,2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 15,9 \\ 157,3 \\ 511 \end{bmatrix}$
$\beta_2 = 2,2$ $2,2 \cdot \begin{bmatrix} 65,3 \\ -59,7 \\ -26,3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 143,6 \\ -131,3 \\ -57,9 \end{bmatrix}$	$\beta_2 = 2,5$ $2,5 \cdot \begin{bmatrix} 74,6 \\ -66,2 \\ -30 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 186,5 \\ -165,5 \\ -75 \end{bmatrix}$
$\beta_3 = 2,2$ $2,2 \cdot \begin{bmatrix} 36,9 \\ 165,5 \\ -163 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 81,2 \\ 364,1 \\ -358,6 \end{bmatrix}$	$\beta_3 = 2,5$ $2,5 \cdot \begin{bmatrix} 41,1 \\ 189,1 \\ -186,3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 102,8 \\ 472,7 \\ -465,8 \end{bmatrix}$

В таблице 6 представлено сравнение расчетных изгибающих моментов.

Таблица 6. Сравнение изгибающих моментов
Table 6. Comparison of bending moments

Собственная форма колебаний	Точка	Момент, СП	Момент, СНиП	Разница, %
СФК-1	2	333,9	216,3	35,2
	3	2758,7	1788,5	35,2
	4	9600,7	6224,5	35,2
СФК-2	2	3916,5	3015,6	23,0
	3	4210,5	3187,8	24,3
	4	3670,5	2731,8	25,6
СФК-3	2	2158,8	1705,2	21,0
	3	10215,8	7939,4	22,3
	4	11312,8	8806,4	22,2
Суммарная	2	5243,9	3471	33,8
	3	11388,6	8740,4	23,3
	4	15284,8	11124,7	27,2

Подводя итоги, можно сделать несколько ключевых выводов, позволяющих оценить дефицит сейсмостойкости сооружений горнодобывающей промышленности, построенных до принятия актуальных норм проектирования:

1. Изменился K_1 – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения. По СНиП II-7-81* $K_1 = 0,35$, а по СП 14.13330.2018 $K_1 = 0,4$ для данного типа сооружений.

2. В СП 14.13330.2018 появился дополнительный коэффициент при определении значение сейсмической нагрузки K_0 – коэффициент, учитывающий назначение сооружения.

3. В расчете значения сейсмической нагрузки по СНиП II-7-81* участвует матрица нагрузок в кН [Q], а в СП 14.13330.2018 матрица масс [m], при точном расчете, это увеличивает запас прочности по новому СП.

4. Изменился способ расчета коэффициентов β_i . Полученные по СП 14.13330.2018 больше полученных по СНиП II-7-81* в среднем на 20 %.

5. Ввиду вышеперечисленного отличие в расчетных изгибающих моментов составляет в среднем 27,4 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгов Г.В., Колосов С.М., Дургел-Оглы Ю.В., Друзякин С.Л., Петров О.Ю. Изменения требований к кирпичным дымовым трубам в актуальной редакции СНиП 2.09.03-85* // Научные труды КубГТУ. 2016. № 3. С. 199–204.
2. Акатьев В.А., Волкова Л.В., Тюрин М.П., Бородин Е.С. Учет начальных признаков критической деградации дымовой трубы в анализе риска ее разрушения // Безопасность в техносфере. 2018. № 4. С. 11–16. DOI: 10.12737/article_5cf6646e9e17c2.03590798.
3. Guedes J.M., Lopes V., Quelhas B., Costa A., Ilharco T., Coelho F. Brick masonry industrial chimneys: assessment, evaluation and intervention // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2019. Vol. 377(2155). 20190012. DOI:10.1098/rsta.2019.0012.
4. Brzev S., Mitra K. Earthquake-Resistant Confined Masonry Construction. National Information Centre of Earthquake Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, 2018. 137 p.
5. Pallarés F.J., Agüero A., & Ivorra S. A comparison of different failure criteria in a numerical seismic assessment of an industrial brickwork chimney // Materials and Structures. 2009. No. 42. Vol. 2. Pp. 213–226. DOI: 10.1617/s11527-008-9379-5.
6. López-Patiño G., Adam J., Gimeno P., Milani G. Causes of damage to industrial brick masonry chimneys // Engineering Failure Analysis. Vol. 74. Pp. 188–201. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.01.014.
7. Longarini N., Zucca M. A chimney's seismic assessment by a tuned mass damper // Engineering Structures. vol. 79. Pp. 290–296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.05.020.
8. Minghini, F., Milani, G., & Tralli, A. Seismic risk assessment of a 50m high masonry chimney using advanced analysis techniques // Engineering Structures. 2014. Vol. 69. Pp. 255–270. doi:10.1016/j.engstruct.2014.03.028.
9. Minghini F., Bertolesi E., Del Grosso A., Milani G., Tralli A. Modal pushover and response history analyses of a masonry chimney before and after shortening // Engineering Structures. Vol. 110. Pp. 307–324. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.11.016.
10. Тяпин А.Г. Некоторые соображения о нормах нового поколения. Часть I: общие положения и

задание сейсмического воздействия. Часть II: определение сейсмических усилий в линейно-спектральном методе // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019. № 5. С. 7-18.

11. Литвинова Э.В. Определение параметров динамических характеристик колебаний строительных конструкций, зданий и сооружений // Строительство и техногенная безопасность. 2017. № 9 (61). С. 93-100.

12. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб.: Наука, 1998. 254 с.

13. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия (Справочник проектировщика) / Под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. М.: Стройиздат, 1981. 216 с.

14. Амосов А.А., Синицын С.Б. Основы теории сейсмостойкости сооружений: учеб. пособие для вузов. М-во образования Рос. Федерации. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во АСБ, 2010. 134 с.

REFERENCES

1. Dolgov G.V., Kolosov S.M., Durgel-Ogly Y.V., Druzyakin S. L., Petrov O. Y. Changes requirement for brick flues in the current edition SNIP 2.09.03-85 // Scientific works of the Kuban State Technological University. 2016. Vol. 3. Pp. 199–204.

2. Akatev V., Volkova L. V., Tyurin M. P., Borodina E. S. Taking into Account the Initial Signs of Critical Degradation of a Chimney in the Analysis of the Risk of Its Destruction // Safety in Technosphere. 2018. Vol. 4. Pp. 11-16. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5cf6646e9e17c2.03590798.

3. Guedes J.M., Lopes V., Quelhas B., Costa A., Ilharco T., Coelho F. Brick masonry industrial chimneys: assessment, evaluation and intervention // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2019. Vol. 377(2155). 20190012. DOI:10.1098/rsta.2019.0012.

4. Brzev S., Mitra K. Earthquake-Resistant Confined Masonry Construction. National Information Centre of Earthquake Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, 2018. 137 p.

5. Pallarés F.J., Agüero A., & Ivorra S. A comparison of different failure criteria in a numerical seismic assessment of an industrial brickwork chimney // Materials and Structures. 2009. No. 42. Vol. 2. Pp. 213–226. DOI: 10.1617/s11527-008-9379-5.

6. López-Patiño G., Adam J., Gimeno P., Milani G. Causes of damage to industrial brick masonry chimneys // Engineering Failure Analysis. Vol. 74. Pp. 188-201. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.01.014.

7. Longarini N., Zucca M. A chimney's seismic assessment by a tuned mass damper // Engineering Structures. vol. 79. Pp. 290-296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.05.020.

8. Minghini, F., Milani, G., & Tralli, A. Seismic risk assessment of a 50m high masonry chimney using advanced analysis techniques // Engineering Structures. 2014. Vol. 69. Pp. 255–270. doi:10.1016/j.engstruct.2014.03.028.

9. Minghini F., Bertolesi E., Del Grosso A., Milani G., Tralli A. Modal pushover and response history analyses of a masonry chimney before and after shortening // Engineering Structures. Vol. 110. Pp. 307–324. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.11.016.

10. Litvinova E.V. Determination of parameters of dynamic characteristics of vibrations of building constructions, buildings and structures // Construction and industrial safety. 2017. Vol. 9. No. 61. Pp. 93–100.

11. Tyapin A.G. Some comments on the new generation of standards in earthquake engineering. Part I: general requirements and seismic input. Part II: seismic forces in linear-spectral method // Earthquake engineering. Constructions safety. 2019. Vol. 5. Pp. 7-18.

12. Birbrayer A.N. Raschet konstruktsey na seysmostoykost [Calculation of designs on seismic stability]. SPb.: Nauka, 1998. 254 p. (In Russ.).

13. Dinamicheskiy raschet sooruzheniy na spayetsialnyye vozdeystviya (Spravochnik proyektirovshchika) [Dynamic calculation of constructions on spayetsialny influences (The reference book of the designer)] / Editors: B. G. Korenev, I. M. Rabinovich. M.: Stroyizdat, 1981. 216 p. (In Russ.).

14. Amosov A. A., Sinitsyn S. B. Osnovy teorii seismostoikosti sooruzhenii: ucheb. posobie dlya vuzov [Fundamentals of the theory of earthquake resistance of structures] / 2nd edition. M.: ACB, 2010. 134 p.

ASSESSMENT OF THE SEISMIC RESISTANCE DEFICIT OF BRICK MASONRY CHIMNEY ACCORDING TO RELEVANT DESIGN CODES

Abaev¹ Z. K., Kodzaev² M. Yu., Valiev³ A. D.

^{1, 2, 3} North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy
(State Technological University), NCIMM (STU)
Nicolaeva st. 44, Vladikavkaz, Russia, 362021

e-mail: ¹abaich@yandex.ru, ² m_kodzaev@mail.ru, ³ azamat99valiev@gmail.com

Abstract. Most of the brick masonry chimneys located in earthquake-prone areas were built long before the current design codes were adopted, which poses a great threat to the sustainable operation and development of the city industry as a whole. This article presents a consistent example of assessing the deficit of earthquake resistance of a brick masonry chimney and gives general conclusions about changes in main coefficients of designed codes. *This study aims* to quantify the deficit of earthquake resistance of brick masonry chimney according to the relevant Building Codes “SP 14.13330.2018 Construction in seismic areas”.

The object of study: a brick masonry chimney with a height of 45 m.

Subject: methods for calculating buildings and structures for seismic impact; methods for quantifying the deficit of earthquake resistance of buildings and structures.

Materials and methods: The calculation was performed by the linear-spectral theory. Natural frequencies and periods, dynamicity coefficient, seismic forces and bending moments for all forms of free vibrations were determined.

Results:

Conclusions: The analysis made it possible to draw the following conclusions: *a)* The coefficient that takes into account the allowed damages has changed from $K_1 = 0.35$ (SNiP) to $K_1 = 0.4$ (SP) for this type of structures; *b)* in SP there is an additional factor in determining the value of the seismic load – coefficient taking into account the purpose of structure; *c)* in calculating the value of seismic loads according to SNiP involved matrix loads in kN $[Q]$ and the mass matrix $[m]$, for accurate calculation, it increases the margin on a new SP; *d)* changed the method of calculation coefficients. The results obtained from the SP are approximately 20 % higher than those obtained from the SNiP; *e)* the difference in the total response of the structure (bending moments) is on average 27.4 %.

Key words: earthquake resistance, seismic hazard, linear-spectral method, brick masonry chimney