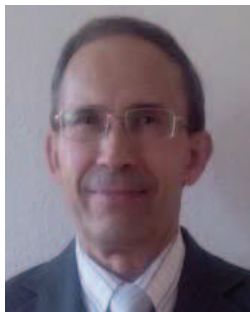




Doi: 10.33644/01105

УДК 550.34; 699.841:624.04



**МАРЬЕНКОВ Н.Г.**

Д-р технических наук, зав. отделом, Государственное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций», г. Киев, Украина, e-mail: n.maryenkov@ndibk.gov.ua тел.: +38 (050) 415-36-03 ORCID: 0000-0001-8613-877X



**БАБИК К.Н.**

Канд. технических наук, зав. лабораторией, Государственное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций», г. Киев, Украина, e-mail: k.babik@ndibk.gov.ua тел.: +38 (050) 415-37-58 ORCID: 0000-0002-8763-510X



**БОГДАН Д.В.**

Канд. технических наук, научный сотрудник, Государственное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций», г. Киев, Украина, e-mail: d.v.bogdan@ndibk.gov.ua тел.: +38 (095) 736-09-23 ORCID: 0000-0003-2954-3140

## ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ ТРУБЫ ВЫСОТОЙ 150 М НА ОСНОВЕ НАТУРНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты оценки несущей способности строительных конструкций железобетонной вентиляционной трубы высотой 150 м при сейсмических воздействиях и нагрузках от смерча, с учетом результатов натурных динамических и инструментальных обследований строительных конструкций, на основе численных исследований линейной и нелинейной пространственных расчетных моделей.

Реализация поставленной цели была достигнута за счет решения следующих задач:

- проведения вибродинамических обследований;
- определение прочности бетонных конструкций ультразвуковым методом;
- разработки линейной и нелинейной пространственных расчетных моделей трубы;
- выполнения расчетов на воздействия смерча класса F3 и сейсмических воздействий интенсивностью 6 баллов (МРЗ) и 7 баллов (выше МРЗ).

По результатам вибродинамических обследо-

ваний определены фактические динамические параметры конструкций вентиляционной трубы (формы колебания, преобладающие периоды и частоты при колебаниях по основным формам). По результатам инструментальных исследований конструкций ультразвуковым методом определены фактические характеристики прочности конструкций бетона. Полученные натурные данные использованы при разработке пространственных расчетных моделей сооружения.

Для определения несущей способности конструкций выполнены расчеты моделей с использованием программного комплекса «ЛИРА САПР», который является компьютерной системой для структурного анализа и проектирования.

Расчеты выполнены на нагрузки от смерча класса F3, а также сейсмические воздействия интенсивностью 6 и 7 баллов, определенные по спектральному методу. Дополнительно выполнена оценка несущей способности железобетонных конструкций сооружения, при экстремальных нагрузках (сейсмических 7 баллов и смерча класса F3)



с учетом пластических свойств бетона и арматуры. Использован нелинейный статический анализ (Pushover analysis) конструкций, применяемый в нормах Украины, Евросоюза, США и других странах при оценке сейсмостойкости эксплуатируемых сооружений.

По результатам исследований получены параметры напряженно-деформированного состояния конструкций железобетонной вентиляционной трубы при рассмотренных сейсмических и смерчевых нагрузках, подготовлены рекомендации по снижению возможных последствий землетрясения интенсивностью 7 баллов и смерча класса F3.

## THE CIVIL STRUCTURES BEARING CAPACITY ASSESSMENT FOR 150 M HIGH REINFORCED CONCRETE VENTILATION PIPE BASED ON THE FIELD AND NUMERICAL SURVEYS

### ABSTRACT

In the paper the results of the building structures bearing capacity assessment are presented for a reinforced concrete ventilation pipe with a height of 150 m under seismic effects and tornado loads, taking into account the results of full-scale dynamic and instrumental building structures surveys, based on the linear and nonlinear spatial design models numerical studies.

This goal was achieved by solving the following tasks:

- the vibrodynamic surveys execution;
- the concrete structures strength determination by an ultrasonic method;
- development of linear and nonlinear spatial design models of the pipe;
- the calculations of class F3 tornado effects and intensities 6 (MDE) and 7 (above MDE) seismic impacts.

Based on the results of vibrodynamic surveys, the actual dynamic parameters of the ventilation pipe structures were determined (vibration modes, prevailing periods and frequencies during principal modes vibrations). Based on the results of structures instrumental studies by ultrasonic method, the actual characteristics of concrete structures strength are determined. The obtained field data were used in the development of the facility spatial design models.

To determine the bearing capacity of structures, the models calculations were performed using the LIRA CAD software package, which is a computer system for structural analysis and design.

The calculations were performed for the class F3 tornado loads, as well as the intensities 6 and 7 seismic effects determined by the spectral method. Additionally, the bearing capacity of facility reinforced concrete structures was assessed under extreme loads (intensity 7 seismic impacts and class F3 tornado) taking into account the concrete and reinforcement plastic properties. The structures non-linear static

analysis (Pushover analysis) applied in the standards of Ukraine, the European Union, the USA and other countries for the assessment of the operating structures seismic resistance was used.

Based on the results of the research, the reinforced concrete ventilation pipe structures stress-strain state parameters under the considered seismic and tornado loads were obtained and the recommendations were prepared to reduce the possible consequences of an intensity 7 earthquake and a class F3 tornado.

### ВВЕДЕНИЕ

#### АНАЛИЗ ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Вентиляционная труба находится на территории охраняемой зоны Чернобыльской АЭС (ЧАЭС), введена в эксплуатацию в мае 1978 г. Железобетонная труба высотой 150,0 м имеет внутренний выходной диаметр 6,5 м. Труба запроектирована для отвода не агрессивных по отношению к бетону газов с максимальной температурой у входа  $+60^{\circ}$  и минимальной  $+20^{\circ}$  с влажностью до 50%.

Ствол трубы выполнен из монолитного железобетона (проектный класс бетона C20/25). Уклон наружной поверхности ствола переменный по высоте, уклон нижней части искусственный (из-за расположения в цоколе газгольдера). Стены ствола вентиляционной трубы состоят из поясов высотой 2,5 м. Всего по высоте трубы устроено 60 поясов. Толщина стен ствола переменная и изменяется по высоте трубы от 1000 мм на отметках 0,000 ... + 30,000 м до 200 мм на отметках +110,000 ... +150,000 м.

Фундамент - монолитный железобетонный выполнен из бетона класса C20/25, круглый в плане, состоящий из стакана и плоской плиты. Стакан имеет форму усеченного конуса высотой 2,5 м; наружный диаметр в основании составляет 11 м. Стакан опирается на плиту толщиной 3,0 м и диаметром 30 м. Глубина заложения фундамента от уровня поверхности земли составляет 5,5 м.

Выполнен комплекс экспериментально-теоретических исследований для обоснования сейсмостойкости конструкций при максимальном расчетном землетрясении 6 баллов, а также при сверхпроектных воздействиях (смерч класса F3 и землетрясение интенсивностью 7 баллов).

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ

Главной целью работы является проведение натурных динамических и инструментальных обследований строительных конструкций вентрубы, выполнение численных исследований линейной и нелинейной пространственных моделей, оценка несущей способности строительных конструкций при сейсмических воздействиях и смерча класса F3, разработка рекомендаций по дальнейшей эксплуатации.



Реализация поставленной цели была достигнута за счет решения следующих задач:

- проведения вибродинамических обследований;
- определение прочности бетона конструкций ультразвуковым методом;
- разработки расчетной модели трубы и выполнения расчетов на воздействия смерча класса F3 и сейсмические воздействия интенсивностью 6 баллов (МРЗ) и 7 баллов (выше МРЗ).

## МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью проведения натурных вибродинамических обследований является определение фактических динамических параметров (форм колебаний, а также преобладающих периодов и частот при колебаниях по основным формам) конструкций вентиляционной трубы ВТ-1.

Для регистрации динамической реакции конструкций сооружения при вибрационных воздействиях была разработана соответствующая методика вибродинамических обследований, которая предусматривала измерение виброускорений строительных конструкций трубы в двух направлениях (вдоль осей Y и X) в горизонтальной плоскости согласно ДСТУ ISO 4866:2008 [1].

В рамках разработанной методики была реализована схема размещения вибродатчиков, показанная на рис. 1.

Регистрация вибросигналов выполнялась с использованием комплекта автономной беспроводной многоканальной системы мониторинга строительных конструкций [2].

Источниками вибрационного воздействия на конструкцию вентиляционной трубы являлись ветровые воздействия, грузовой автотранспорт и виброактивное оборудование, работающее на промплощадке ЧАЭС.

На рисунках 2 и 3 приведены записи расчетных амплитудных спектров перемещений конструкций вентиляционной трубы ВТ-1 в направлении Y, зарегистрированные у основания трубы и на ее конструкции в различных точках измерения.

## ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ И ИХ АПРОБАЦИЯ

На основе конструктивной схемы венттрубы в программном комплексе ЛИРА-САПР 2017 [3], была разработана компьютерная модель (рис. 4) которая состоит из:

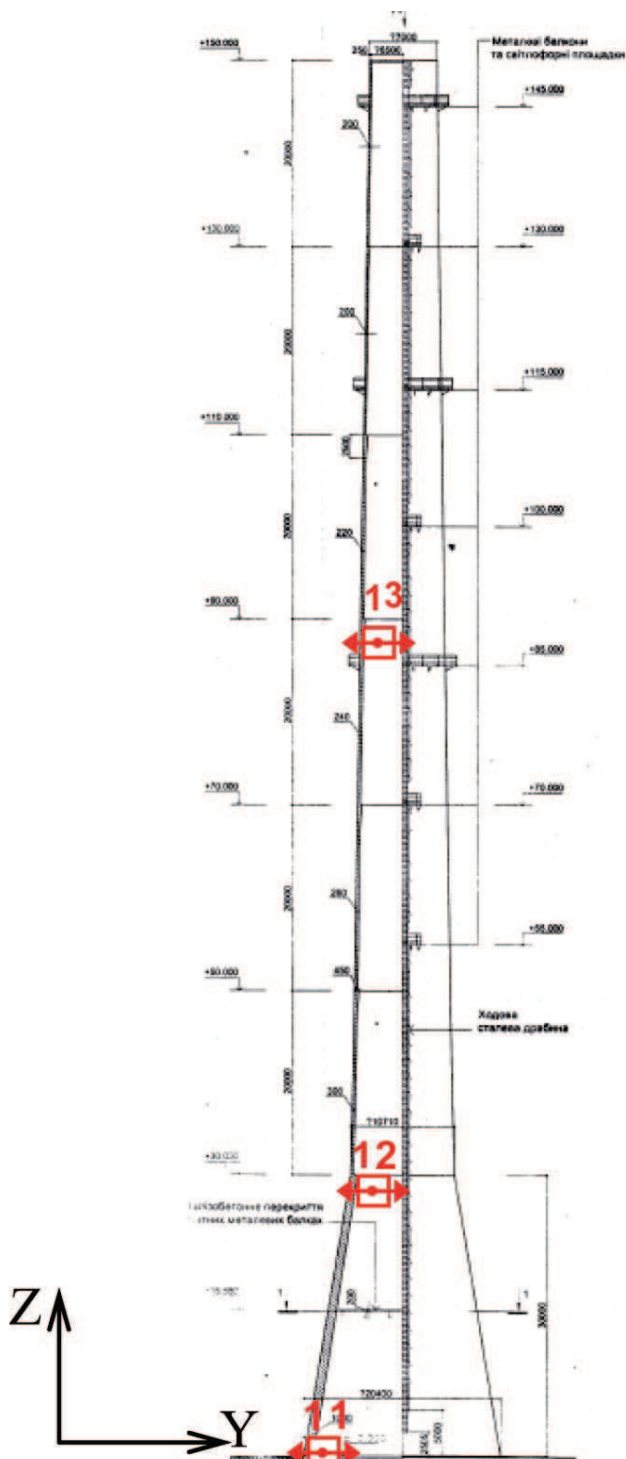
- универсальных четырехугольных конечных элементов оболочки (КЭ 44) с жесткими вставками, моделирующих конический газоотводящий ствол по внешней его поверхности;
- универсальных треугольных и четырехугольных конечных элементов оболочки (КЭ 42 и КЭ 44) с жесткими вставками, моделирующих фундаментную плиту с привязкой ее сре-

динной плоскости к элементам газоотводящего ствола;

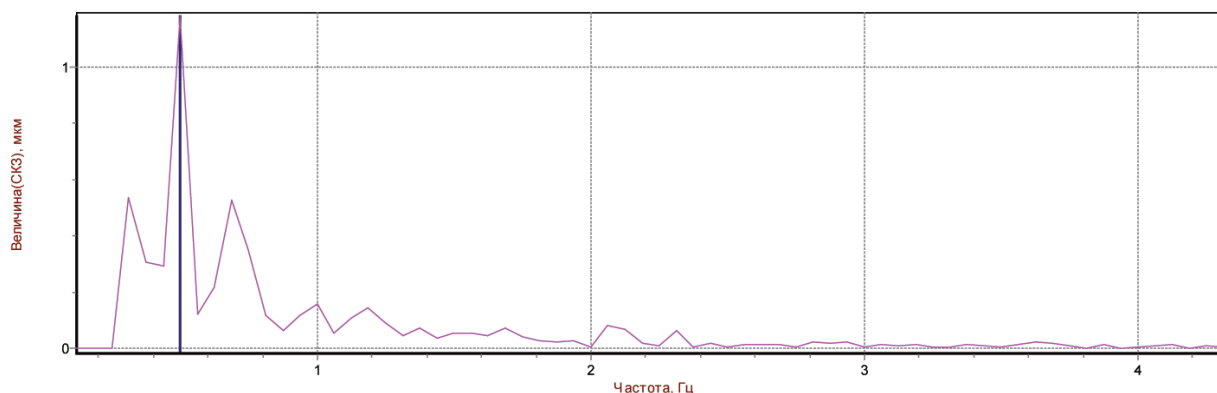
- жестких связей, обеспечивающих неподвижность всего сооружения вдоль главных координатных осей.

В окружном направлении ствол трубы и фундамента разбиты на 36 секторов.

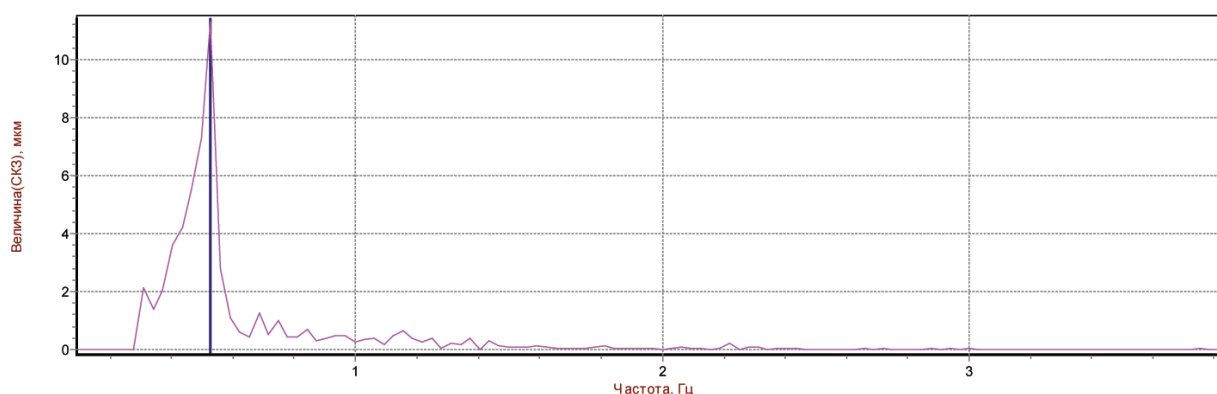
Компьютерная модель венттрубы рассчитана на следующие нагрузки и воздействия:



**Рисунок 1** – Расстановка датчиков по высоте сооружения. - датчик для измерения горизонтальных колебаний



**Рисунок 2** – Амплитудный спектр горизонтальных виброперемещений (вдоль оси Y) фундамента венттрубы на отм. 0,000 м



**Рисунок 3** – Амплитудный спектр горизонтальных виброперемещений (вдоль оси Y) конструкции венттрубы на отм. +85,000 м

- собственный вес, определяемый программно по сечениям конструктивных элементов и расчетной плотности железобетона, равной  $2,75 \text{ т/м}^3$ ;
- постоянную нагрузку, в которую кроме веса конструктивных элементов, вошел вес железобетонной площадки на отметке +15,000.
- нагрузку от смерча класса F3, определяемую по методике, изложенной в [4] применительно к открытым сооружениям, при расчетных параметрах смерча, регламентированных Постановлением [5] и с учетом аэродинамических коэффициентов [6].
- нагрузки от сейсмических воздействий интенсивностью 6 и 7 баллов, определяемые в соответствии с требованиями [7]. При этом коэффициент  $k_1$ , учитывающий неупругие деформации и локальные повреждения элементов сооружения, принят равным 0,625, как для конструкций 1-й категории сейсмостойкости согласно [8].

Расчет на сейсмические воздействия выполнялся для 60 форм собственных колебаний, так

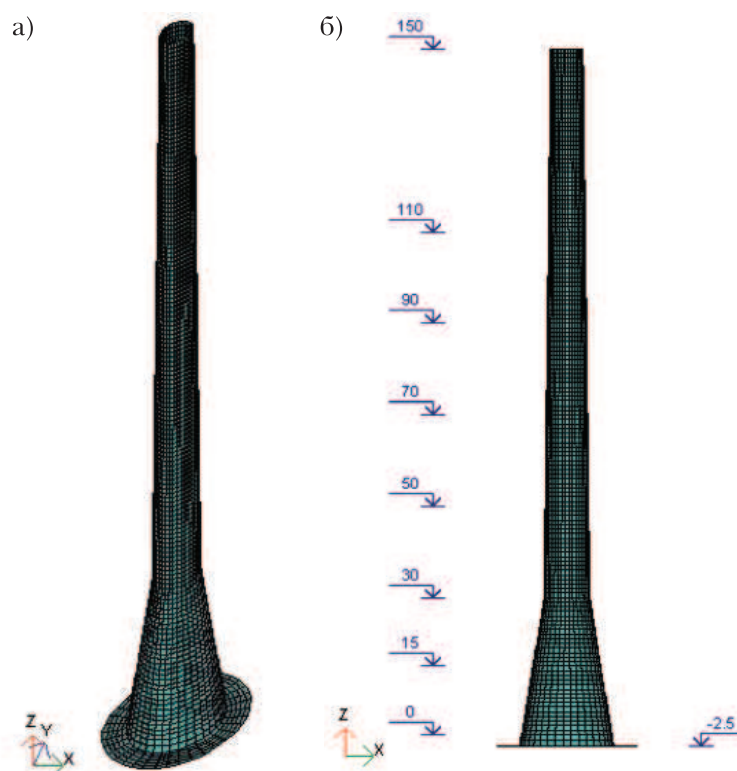
как высшие формы не вносят вклад в увеличение суммы модальных масс. Частота и период для первой формы колебаний (табл. 1) совпадают с результатами, полученными при вибродинамических обследованиях, что говорит о соответствии расчетной модели реальному объекту.

По результатам расчетов пространственной компьютерной модели венттрубы при упругой работе материалов установлено, что при сейсмических воздействиях интенсивностью 6 баллов, расчетное армирование трубы меньше проектного, т.е. сейсмостойкость конструкций венттрубы при воздействии МРЗ обеспечивается.

Выполнена оценка несущей способности железобетонных конструкций венттрубы при сверхпроектных нагрузках (сейсмических интенсивностью 7 баллов и ветровых от смерча класса F3) с учетом пластических свойств бетона и арматуры, т.е. на основе результатов нелинейного статического расчета с учетом проектного армирования.

Расчеты выполнялись с помощью программного комплекса ЛИРА-САПР с учетом физической нелинейности бетона и арматуры. Для бето-





**Рисунок 4** – Компьютерная модель вытяжной трубы: а - общий вид; б – аппликаты характерных участков

на использовался 15-й закон деформирования (экспоненциальная зависимость). В соответствии с проектом венттрубы и результатами по определению прочности бетона, класс бетона принят C20/25 согласно [9]. При расчетах модуль упругости бетона принят  $E_b = 3,06 \cdot 10^4$  МПа. Расчетное сопротивление бетона на сжатие  $f_{cd} = 13,5$  МПа, на растяжение  $f_{ctk} = 1,0$  МПа. Предельные относительные деформации бетона приняты согласно [9] и составляют: при сжатии 0,00166, при растяжении 0,00058.

Для арматуры был принят 11-й закон деформи-

рования (экспоненциальная зависимость). В соответствии с проектом венттрубы принята арматура класса А-III. При расчетах модуль упругости арматуры принят  $E_s = 2,1 \cdot 10^5$  МПа. Расчетное сопротивление арматуры при растяжении и сжатии  $R_s = 340$  МПа.

Для выполнения нелинейных расчетов в пространственной линейной модели венттрубы была произведена замена конечных элементов оболочки (тип 44, линейный) на 244-й (универсальный четырехугольный конечный элемент оболочки), позволяющая учесть физическую нелинейность материалов.

Проведены расчеты пространственной нелинейной модели венттрубы на действие статически приложенных нагрузок для вариантов:

- горизонтальные нагрузки от смерча класса F3;
- сейсмические воздействия интенсивностью 6 баллов (учитывалось действие по трем компонентам X, Y и Z).
- сейсмические воздействия интенсивностью 7 баллов (учитывалось действие по трем компонентам X, Y и Z).

Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) железобетонных конструкций венттрубы на разных отметках при нагрузке 80% от максимальной при смерче, выполнен на основе данных нелинейных расчетов.

Горизонтальное расчетное нелинейное перемещение верха венттрубы равно 2111 мм, что составляет 1/71 высоты венттрубы (рис. 8), что значительно превышает допустимое значение упругого перемещения для высотных зданий, равное 1/1000 высоты здания (п. 4.45 [10]). Поэтому в качестве основного параметра принят перекося, предельное значение которого (из условия недопущения обрушения конструкций), для железобетонных монолитных бескаркасных зданий, при

**Таблица 1** - Расчетные динамические характеристики ВТ-1

Номер формы колебаний	Частота колебаний, Гц	Период колебаний, с	$\Sigma$ модальных масс, %
1	0.526	1.903	0.300
2	0.526	1.903	17.986
3	2.069	0.483	18.089
4	2.069	0.483	26.625
5	2.337	0.428	26.625
6	4.235	0.236	26.633
7	4.235	0.236	31.485
8	5.159	0.194	31.485
9	5.211	0.192	31.485
10	5.211	0.192	31.485



максимальных расчетных землетрясениях равен 0,020 [7].

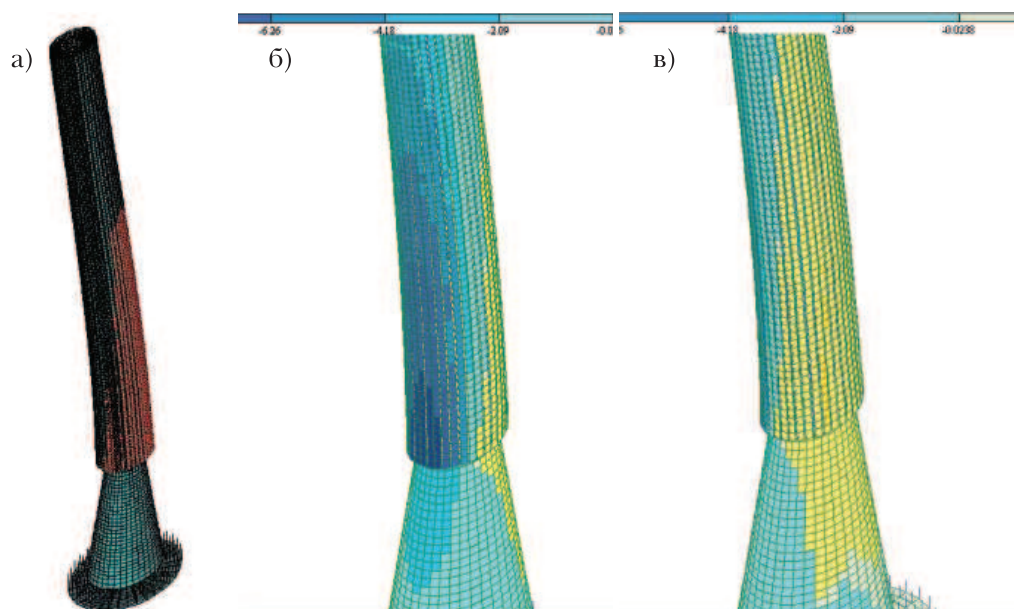
Анализ расчетных значений вертикальных сжимающих напряжений при воздействии смерча показал (рис. 5,б), что наиболее нагруженными являются конструкции ствола венттрубы на отм. +30,000м. При этом величина максимального значения, равного 12,5МПа, меньше предельного сопротивления бетона при сжатии ( $f_{cd}=13,5\text{МПа}$ ).

Анализ расчетных значений вертикальных растягивающих напряжений, при воздействии смерча показал (рис. 5,в), что наиболее нагруженными также являются конструкции вертикального ствола венттрубы на отм. +34,000 - +35,000 м. При этом, величина максимального значения, равного 2,39 МПа, больше предельного сопротивления бетона при растяжении ( $f_{ctk}=1,0\text{МПа}$ ). Это и обуславливает образование трещин, показанных на рис. 5,а.

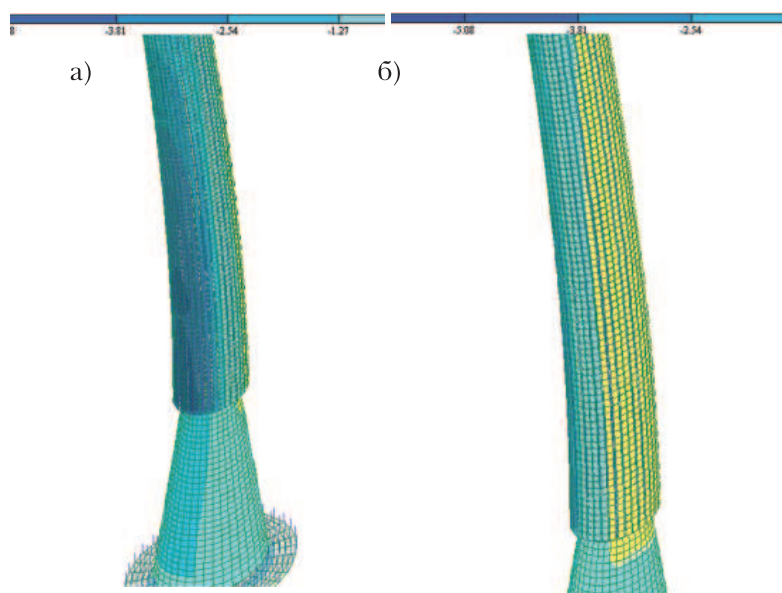
Анализ НДС железобетонных конструкций венттрубы на разных отметках при интенсивности сейсмических воздействий 6 баллов выполнен на основе данных нелинейных расчетов.

Горизонтальное расчетное нелинейное перемещение верха венттрубы равно 1171 мм, что составляет 1/128 ее высоты (см. рис. 8). Расчетные значения перекосов от отметки +90,000 м до +150,000 м равны 0,011-0,012, что почти в два раза меньше предельного значения 0,020 (из условия недопущения обрушения конструкций) для железобетонных монолитных бескаркасных зданий при максимальных расчетных землетрясениях [7]. Сжимающие напряжения в бетоне вертикального ствола венттрубы на отметках от +30,000 м до +40,000 м (рис. 6,а) достигают максимального значения 7,63 МПа, что в два раза меньше предельного сопротивления бетона при сжатии ( $f_{cd}=13,5\text{МПа}$ ).

Из рис. 6,б видно, что растягивающие напряжения в бетоне не превышают 0,64 МПа, что меньше предельного сопротивления бетона при растяже-



**Рисунок 5** – Результаты расчета венттрубы при воздействии смерча класса F3: а - зона образования трещин в растянутом бетоне; б - зона с максимальными сжимающими напряжениями NY; в - зона с максимальными растягивающими напряжениями NY



**Рисунок 6** – Результаты расчета венттрубы при воздействии при нагрузке, равной 80% от максимальной при сейсмическом воздействии 6 баллов: а - зона с максимальными сжимающими напряжениями NY; б - зона с максимальными растягивающими напряжениями NY

нии ( $f_{ctk}=1,0\text{МПа}$ ).

Анализ НДС железобетонных конструкций венттрубы, на разных отметках, при интенсивности сейсмических воздействий 7 баллов, выполнен на основе данных нелинейных расчетов.

Горизонтальное расчетное нелинейное перемещение верха венттрубы равно 2527 мм, что составляет 1/59 высоты венттрубы (см. рис. 8). Расчетные значения перекосов с отметки



+90,000 м до +150,000 м равны 0,024-0,025, что превышает предельное значение 0,020 (из условия недопущения обрушения конструкций) для железобетонных монолитных бескаркасных зданий, при максимальных расчетных землетрясениях [7].

Сжимающие напряжения в бетоне вертикального ствола венттрубы на отметках от +30,000 м до +40,000 м (рис. 7,б) достигают максимального значения 13,3 МПа, что близко к предельному сопротивлению бетона при сжатии ( $f_{cd} = 13,5$  МПа).

Из рис. 7,в видно, что растягивающие напряжения в бетоне превышают предельное сопротивление бетона при растяжении ( $f_{ctk} = 1,0$  МПа). При землетрясении 7 баллов, прогнозируемые зоны текучести растянутой арматуры приведены на рис. 7,а.

Для дальнейшего изучения НДС был проведен нелинейный статический анализ (Pushover Analysis), рекомендуемый нормами Украины, и реализованный в ПК ЛИРА-САПР.

Суть метода заключается в оценке перемещений конструкции путем последовательного анализа её разрушения при действии внешней сейсмической нагрузки (анализ предельной прочности здания).

В результате расчета построен спектр несущей способности (СНС) с последующим наложением на упругий спектр реакций при соответствующем коэффициенте редукции  $R_\mu$  (рис. 9). Точка

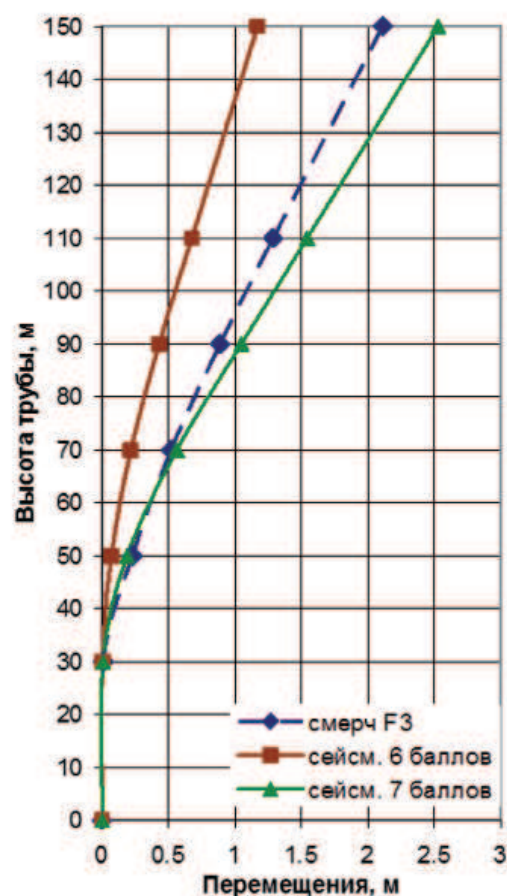


Рисунок 8 – Расчетные горизонтальные перемещения венттрубы на разных отметках

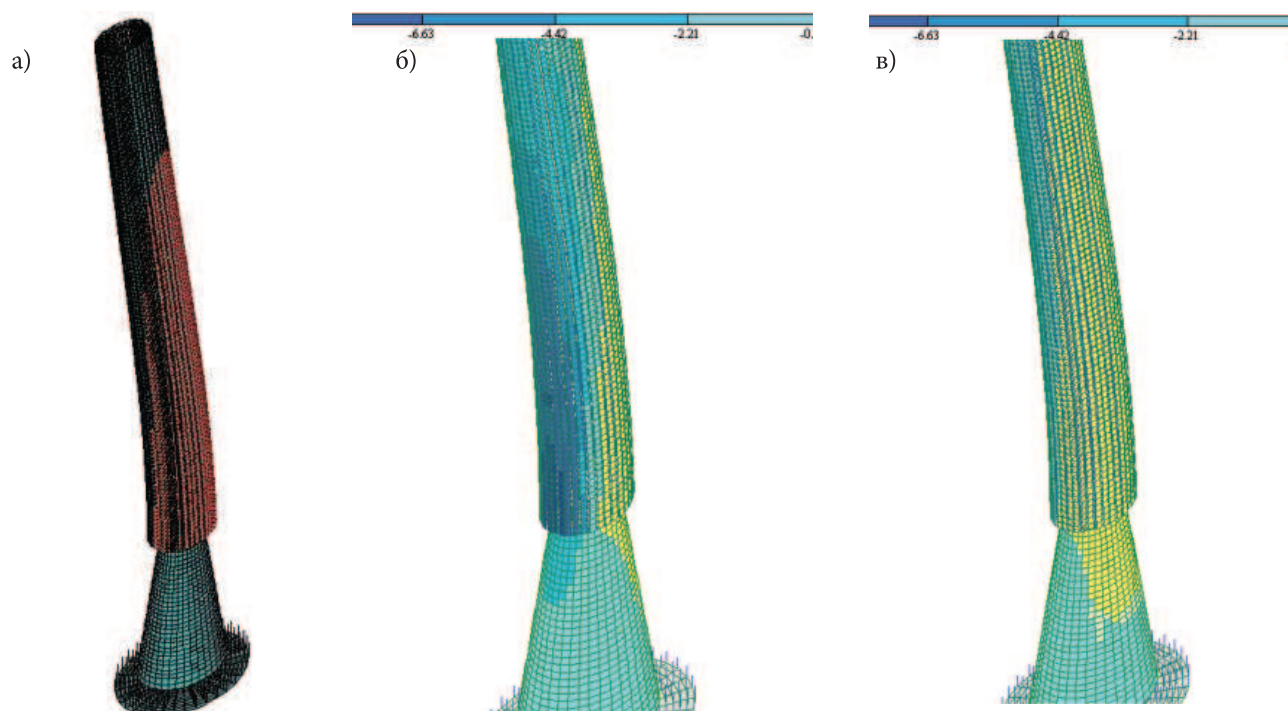
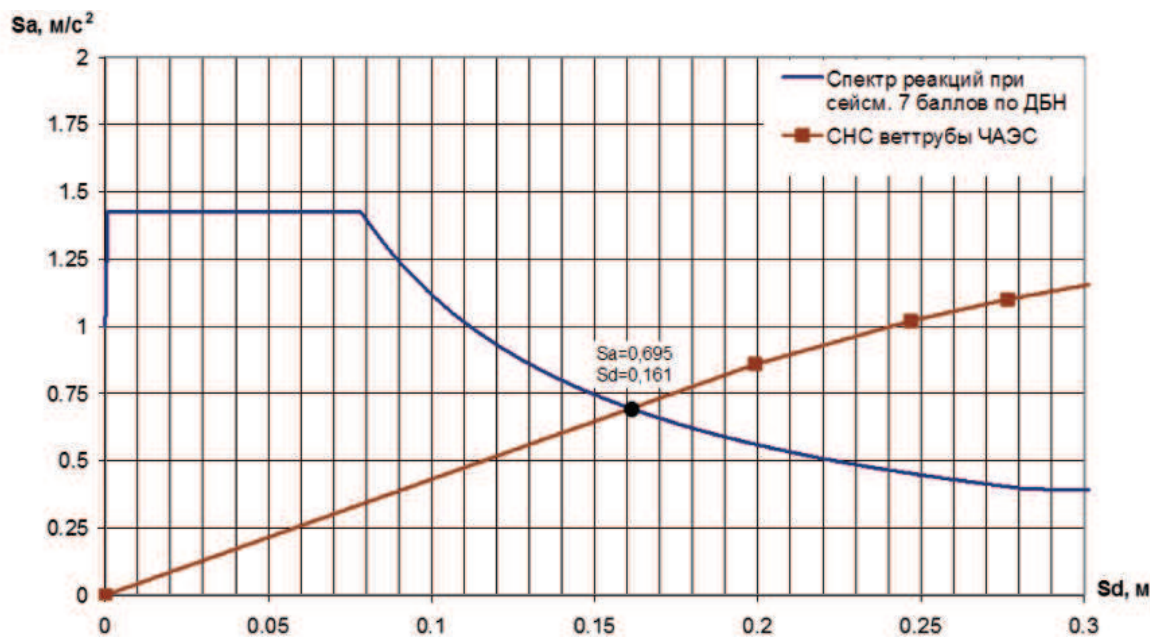


Рисунок 7 – Результаты расчета венттрубы при воздействии при нагрузке, равной 80% от максимальной при сейсмическом воздействии 7 баллов: а - зона образования трещин в растянутом бетоне; б - зона с максимальными сжимающими напряжениями NY; в - зона с максимальными растягивающими напряжениями NY





**Рисунок 9** – Спектр несущей способности веттрубы, построенный в ПК ЛИРА-САПР, где  
• - характеристическая точка,  $S_a$  – спектральное ускорение,  $S_d$  – спектральное перемещение

пересечения спектров является характеристической точкой, которая определяет напряженно-деформированное состояние конструкций веттрубы, при сейсмическом воздействии интенсивностью 7 баллов по упругому спектру [3].

## ВЫВОДЫ

По результатам исследований можно сделать следующие выводы.

1. Разработана программа и методика проведения вибродинамических исследований веттрубы. Фактические данные зарегистрированных параметров колебаний конструкций вентиляционной трубы ВТ-1 использованы для верификации ее расчетной модели.
2. Компьютерная модель веттрубы ВТ-1 соответствует ее конструктивной схеме и позволяет получить достоверную оценку НДС конструкции в целом и отдельных ее элементов. Расчеты выполнены на следующие воздействия: смерч класса F3, сейсмические воздействия интенсивностью 6 и 7 баллов. По результатам расчета по спектральному методу [7] в упругой постановке из всех рассмотренных нагрузок и воздействий наиболее опасными для НДС трубы являются нагрузки от смерча класса F3.

Однако, даже при наиболее невыгодном положении смерча, горизонтальные перемещения вершины трубы составляют 310,5 мм, что меньше  $1/483$  (0,002) ее высоты, что меньше допустимого перекоса при сейсмических воздействиях проектного землетрясения, при котором допустимый перекос составляет 0,01Н.

3. Дополнительно выполнена оценка несущей способности железобетонных конструкций вытяжной трубы при заданных экстремальных нагрузках (сейсмических и ветровых от смерча), при учете пластических свойств бетона и арматуры, т.е. на основе нелинейного статического расчета. При этом получены следующие результаты:

- при горизонтальной нагрузке, равной 90% от максимальной при воздействии смерча класса F3, зона пластических шарниров распространяется на всю высоту конструкции веттрубы, которая превращается в механизм и в результате происходит разрушение сооружения;
- анализ расчетных данных о перемещениях, перекосах, максимальных сжимающих и растягивающих напряжениях в бетоне позволяет сделать вывод, что при землетрясении интенсивностью 6 баллов прочность конструкции веттрубы обеспечена;
- полученные расчетные данные о перемещениях, перекосах, зонах образования трещин в бетоне и зонах текучести растянутой арматуры позволяют сделать вывод, что при землетрясении интенсивностью 7 баллов прогнозируется разрушение конструкции веттрубы прежде всего на отметках от +30,000 м до +40,000 м, а также от +90,000 м до +150,000 м.

4. В целом, по результатам расчета можно сделать вывод о том, что при смерче класса F3 как и при сейсмическом воздействии 7 баллов происходит разрушение вентиляционной трубы от отм. +30,000 м до верха.





5. На основании исследований рекомендовано предпринять меры по ликвидации возможных последствий землетрясения интенсивностью 7 баллов и смерча класса F3.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ДСТУ ISO 4866:2008. Вібрація та удар механічні. Вібрація будівель. Настанова щодо вимірювання вібрації та оцінювання її впливу на будівлі.
2. Руководство пользователя. Сейсмомониторинг. Киев: «Диатос», НТУ «КПИ». 2009.
3. Программный комплекс Лира-Сапр. Руководство пользователя. Обучающие примеры / под ред. академика АИН Украины А. С. Городецкого. 2017. 535 с.
4. Симиу Э., Сканлан Р.. Воздействие ветра на здания и сооружения. М.: Стройиздат. 1984.
5. Основные нормативные требования и расчетные характеристики смерчей для площадки Чернобыльской АЭС. Информационный бюллетень Держбуду. 2002. №10.
6. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. К.: Мінрегіон України. 2006. С. 54.
7. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво у сейсмічних районах України. К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2014. 110 с.
8. НП 306.2.208-2016. Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій.
9. ДБН В 2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування. Київ: Мінрегіон України. 2011. 71с.
10. ДБН В.2.2-24:2009. Проектування висотних житлових і громадських будинків. Київ: Мінрегіон України. 2009. 133 с.

6. Loads and actions: DNB V.1.2-2:2006. (2007).
7. Construction in seismic regions of Ukraine: DNB V.1.1-12:2014. (2014).
8. Requirements for seismic-resistant design and seismic safety assessment of nuclear power plant units: NP 306.2.208-2016.
9. Concrete and reinforced concrete structures. Basic design provisions: DNB V.2.6-98:2009. (2011).
10. Buildings and structures. Design of high-rise residential and public buildings: DNB V.2.2-24:2009. (2009).

Стаття надійшла до редакції 15.01.2020 року

#### REFERENCES

1. Mechanical vibration and shock. Vibration of buildings. Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings: ДСТУ ISO 4866:2008. (2010).
2. Seismomonitoring: User's manual. (2009). Kyiv: Diatos; NTU "KPI".
3. Horodetskyi, A.S. (Ed.). (2017). SW "LIRA-CAD": User's manual: Learning examples.
4. Simiu, E., & Skanlan, R. (1984). Wind action on buildings and facilities. Moscow: Stroizdat.
5. Tornadoes basic regulatory requirements and design characteristics for the Chernobyl nuclear power plant site. (2002). Derzhbud Informational Bulletin, 10.