

УДК 628.134, 699.841

DOI [10.37153/2618-9283-2023-1-54-67](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-1-54-67)

## **Сейсмозащита и сейсмоизоляция зданий и сооружений**

### **Пневмозащита водонапорных башен**

**Сабирова Ойпошша Бахтияровна<sup>1</sup>, Зенченкова Диана Вениаминовна<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I (ПГУПС). Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация:** Рассматривается эффективность применения пневмозащиты для снижения сейсмических нагрузок на водонапорную башню. Башня несет резервуар емкостью 30 м<sup>3</sup>. В качестве пневмозащиты использованы емкости с воздухом, размещенные по периметру резервуара в зоне максимального гидродинамического давления. Объем воздуха принят по рекомендациям О.А. Савинова и М.М. Пейчева и составляет 4 м<sup>3</sup>. Анализ уравнений гидродинамики позволяет разделить жидкость в резервуаре на две части. Одна часть соединена с резервуаром жестко (присоединенная масса жидкости), а вторая с помощью пружины, моделирующей воздушный амортизатор. В выполненных расчетах присоединенная масса составила 14 т. Эффект снижения оказался меньше, чем ожидалось. Это связано с тем, что сама конструкция башни достаточно тяжелая, и нагрузка от собственного веса примерно равна нагрузке от веса жидкости. Поэтому двукратное снижение нагрузки от жидкости снижает общую нагрузку только на 25%.

**Цель:** Повысить сейсмостойкость водонапорных башен, путем применения пневмозащиты. Традиционно, сейсмостойкость водонапорных башен обеспечивается конструктивным решением ствола башни, повышение сейсмостойкости уже эксплуатируемых башен в таком случае проблематично. В связи с этим поставлена задача изменения динамических характеристик сооружения за счет применения пневмозащиты непосредственно в резервуаре сооружения.

**Методы:** В статье рассматривается конструктивное решение внутренней пневмозащиты и методика расчета водонапорных башен с ее применением на сейсмические нагрузки, дается оценка эффективности такого типа сейсмозащиты. Выполнен численный расчет объемов пневмозащиты и численных значений параметров расчетно-динамической модели конструкции водонапорной башни с внутренней пневмозащитой применительно к башне А.А. Рожновского. Выполнены расчеты на сейсмическое воздействие и определены усилия в конструктивных элементах водонапорной башне без пневмозащиты и при ее устройстве.

**Результаты:** Проведен сравнительный анализ колебаний водонапорной башни без пневмозащиты и при ее наличии. Результаты показывают, что при наличии пневмозащиты изменяются динамические характеристики системы, что приводит к снижению сейсмических нагрузок и значительному уменьшению усилий в конструкции водонапорной башни, в том числе в стволе.

**Практическая значимость:** Устройство внутренней пневмозащиты, позволит обеспечить сейсмостойкость, в том числе эксплуатируемых водонапорных башен в тех районах, где сейсмичность площадки строительства была повышена вследствие пересмотра карт общего сейсмического районирования. Внутренняя пневмозащита позволяет не предусматривать дополнительное утепление пневмозащитных установок,

так как они находятся внутри резервуара. Кроме того, такое решение облегчает эксплуатацию водонапорной башни, снабженной пневмозащитой, так как конструктивные элементы устройства защищены от внешних воздействий.

**Ключевые слова:** пневмозащита, сейсмостойкие водонапорные башни, расчетно-динамическая модель, объем пневмозащиты, формы колебаний

**Для цитирования:** Сабирова О.Б., Зенченкова Д.В. Пневмозащита водонапорных башен // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 1. С. 54–67 DOI [10.37153/2618-9283-2023-1-54-67](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-1-54-67)

**Благодарности:** Авторы благодарят профессора А.М. Уздина за помощь при подготовке статьи.

## ***Seismic safety and seismic isolation of buildings***

### **Pneumatic protection of water towers**

**Oyposhsha B. Sabirova<sup>1</sup>, Diana V. Zenchenkova<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS).  
St. Petersburg, Russian Federation

The paper discusses the effectiveness of using pneumatic protection to reduce seismic loads on a water tower. The tower carries a reservoir with a capacity of 30 m<sup>3</sup>. Air tanks, used as pneumatic protection, are placed along the reservoir perimeter in the zone of maximum hydrodynamic pressure. The volume of air was accepted according to the recommendations of O.A. Savinov and M.M. Peychev and is equal to 4 m<sup>3</sup>. The analysis of the hydrodynamic equations makes it possible to divide the liquid in the reservoir into two parts. One part is rigidly connected to the reservoir (attached mass of liquid), and the second part is connected with the tank by a spring simulating an air shock absorber. In the performed calculations, the added mass was 14 tons. The effect of the seismic load decrease was less than expected. This is due to the fact that the structure of the tower itself is quite heavy, and the load from its own weight is approximately equal to the load caused by the weight of the liquid. Therefore, doubling the liquid load reduces the total load by only 25%.

**Purpose:** To increase the seismic resistance of water towers by applying pneumatic protection. Traditionally, the seismic resistance of water towers is provided by a constructive solution of the tower shaft; in this case, increasing the seismic resistance of already operated towers is problematic. In this regard, the task was set to change the dynamic characteristics of the structure through the use of pneumatic protection directly in the reservoir of the structure.

**Methods:** The article discusses the constructive solution of internal pneumatic protection and the method of calculating water towers with its application to seismic loads, and evaluates the effectiveness of this type of seismic protection. A numerical calculation of the volumes of pneumatic protection and numerical values of the parameters of the calculation-dynamic model of the design of a water tower with internal pneumatic protection in relation to the A.A. Rozhnovsky. Calculations for seismic impact have been performed and forces in the structural elements of a water tower without pneumatic protection and with its installation have been determined.

**Results:** A comparative analysis of the oscillations of a water tower without pneumatic protection and with it was carried out. The results show that in the presence of pneumatic protection, the dynamic characteristics of the system change, which leads to a decrease in

seismic loads and a significant decrease in the forces in the design of the water tower, including in the shaft.

**Practical significance:** The device of internal pneumatic protection will ensure seismic resistance, including operated water towers in those areas where the seismicity of the construction site has been increased due to the revision of general seismic zoning maps. Internal pneumoprotection makes it possible not to provide for additional insulation of pneumoprotective installations, since they are located inside the tank. In addition, this solution facilitates the operation of a water tower equipped with pneumatic protection, since the structural elements of the device are protected from external influences.

**Keywords:** pneumatic protection, earthquake-resistant water towers, computational and dynamic model, volume of pneumatic protection, vibration patterns

**For citation:** Sabirova O.B.<sup>1</sup>, Zenchenkova D.V. Pneumatic protection of water towers. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 1, pp. 54–67 (In Russian)

**DOI** [10.37153/2618-9283-2023-1-54-67](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-1-54-67)

**Acknowledgements:** The authors thank Professor A.M. Uzdin for his help in preparing the article.

## Введение

Как правило, повышение сейсмостойкости водонапорных башен обеспечивается путем разработки различных конструктивных решений ствола башни [1–6]. Качественно другой подход – изменение динамических характеристик сооружения за счет применения пневмозащиты непосредственно в резервуаре сооружения.

## Конструктивное решение пневмозащиты водонапорных башен

Идея сейсмоизоляции жидкости впервые была предложена для не напорных гидротехнических конструкций, а для акваторий с целью предохранения их от различного рода экстремальных воздействий и заключалась в создании воздушной завесы из пузырей воздуха, выпускаемого из перфорированных труб.

В дальнейшем О.А. Савинов и другие специалисты изучали вопрос о возможности использования воздушной завесы для защиты напорных плотин во время землетрясений [7]. Особо следует выделить работы С.И. Шейниной [8, 9], посвященные всестороннему анализу одного из конструктивных вариантов воздушной завесы, предназначенной для повышения сейсмостойкости плотин. В этом случае снижение гидродинамического давления жидкости на плотину достигается установкой непосредственно на напорную грань плотины или на некотором расчетном расстоянии от нее определенного числа открытых снизу стаканов, наполненных воздухом. Помимо снижения гидродинамического давления жидкости, при соответствующей настройке воздушной завесы составляющая гидродинамического давления частично гасит колебания плотины, то есть завеса выполняет функции динамического гасителя колебаний. Полученные результаты этих исследований были использованы в реальных проектах плотин и дали высокий технико-экономический эффект. Такое техническое решение реализовано при строительстве Миатлинской ГЭС [12].

Была попытка реализации пневмозащиты для резервуаров, в том числе, водонапорных башен. Этими вопросами занимались О.А. Савинов, А.М. Уздин и другие [7, 10, 11]. Кроме того, в работе [11] описаны общие рекомендации и попытка

практического применения ДГК в сейсмостойком строительстве. Эти исследования носили теоретический характер и не нашли широкого практического применения. Тем не менее, расчеты показывают, что конструктивное решение в виде пневмозащиты может повысить сейсмостойкость водонапорных башен.

Сущность пневмозащиты сооружения резервуаров с жидкостью состоит в создании упругоподатливого воздушного слоя, по аналогии с пружинным амортизатором, благодаря которому происходит уменьшение гидродинамического давления жидкости на стенки резервуара, а, следовательно, и полного горизонтального усилия.

Вариант конструктивного решения внешней пневмозащиты, предложенный О.А. Савиновым, А.М. Уздиным и другими авторами, показан на рисунке 1.

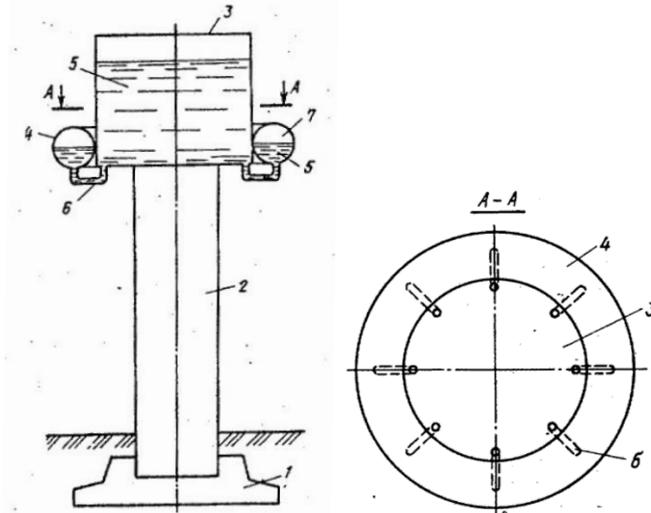


Рисунок 1 – Конструктивная схема внешней пневмозащиты резервуара [7, с.58]:  
1 – фундамент, 2 – ствол башни, 3 – резервуар, 4 – емкости для пневмозащиты резервуара, 5 – жидкость в емкости, 6 – сообщающиеся сосуды, 7 – сжатый воздух

Figure 1 – Structural scheme of external pneumatic protection of the tank [7, p.58]:  
1 – foundation, 2 – tower trunk, 3 – tank, 4 – tanks for pneumatic protection of the tank, 5 – liquid in the tank, 6 – communicating vessels, 7 – compressed air

Принципиальной особенностью изображенной водонапорной башни является наличие дополнительной емкости тороидальной формы, в полости которой содержится сжатый воздух. Емкость взаимодействует с основным баком при помощи системы сообщающихся сосудов. При заполнении бака часть массы воды поступает снизу вверх в полость емкости, постепенно вытесняя кверху и сжимая воздух. Таким образом каждому уровню воды в баке соответствует определенное значение величины давления сжатого воздуха в емкости. Система «резервуар с жидкостью – емкость с воздухом» находится в статическом равновесии. Сообщающиеся сосуды целесообразно выполнить изогнутыми, поскольку вертикальный столб жидкости даже при их относительно небольшой длине будет препятствовать утечке сжатого воздуха из полости емкости в отрицательный полупериод колебаний.

При сейсмических воздействиях наличие системы сообщающихся сосудов позволяет существенно снизить величину гидродинамического давления воды на стенки бака, поскольку часть движущейся массы воды уходит в полость, вызывая при этом упругое сопротивление сжатого воздуха, появление эффекта демпфирования и в конечном итоге, поглощение энергии колебаний. Кроме того, при соответствующих условиях возможен режим динамического гашения колебаний. Но задача в такой

постановке требует более детальных исследований, экспериментов и расчетов. Устройство пневмозащиты обеспечивает высокую сейсмозащиту водонапорных башен без усложнения конструктивного решения ствола. Так же оно применимо для эксплуатируемых водонапорных башен.

Авторы идеи предложили расчетно-динамическую модель исходя из амплитудно-частотной характеристики равнодействующей гидродинамического давления на стенки резервуара, снабженного пневмозащитой. В качестве механической модели была принята система, состоящая из двух масс  $m_1$  и  $m_2$  соединенных друг с другом пружиной с жесткостью  $C$  и показанная на рисунке 2. Неизвестные параметры механической модели определялись из условия совпадения амплитудно-частотной характеристики, реакции  $R$  и гидродинамического давления на стенки резервуара.

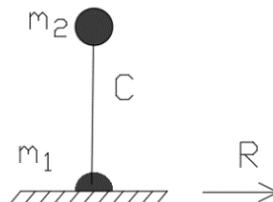


Рисунок 2 – Механическая модель системы с жидким наполнением при наличии наружной пневмозащиты, предложенная А.М. Уздиным, М.М. Пейчевым и др. [11]

Figure 2 – Mechanical model of a system with liquid filling in the presence of external pneumatic protection, proposed by A.M. Uzdin, M.M. Peychev et al. [11]

Идея пневмозащиты, предложенная в 1986 году [11], а также в дальнейшем защищенная авторским правом [13], не получила широкого применения на практике. Кроме того О.А. Савиновым и другими авторами рассмотрен вариант устройства внутренней пневмозащиты непосредственно в объеме резервуара [12]. Идея данного конструктивного решения представлена на рисунке 3.

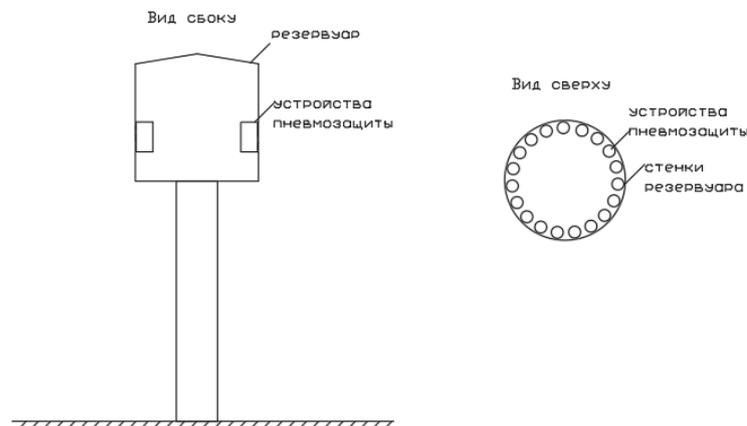


Рисунок 3 – Конструктивная схема внутренней пневмозащиты водонапорной башни

Figure 3 – Constructive scheme of internal pneumatic protection of the water tower

Конструктивно пневмозащита может быть реализована путем размещения у стен резервуара открытых снизу (для свободного поступления жидкости) емкостей с воздухом. При землетрясении горизонтальное давление жидкости на стенки резервуара в месте контакта жидкости с воздухом существенно снижается. Вследствие этого

уменьшается как напряжение в стенке резервуара, так и сейсмическая реакция всего сооружения. При размещении емкости в резервуаре возможно при малых затратах повысить сейсмостойкость как для вновь строящихся, так и для эксплуатируемых водонапорных башен.

Принцип действия внутренней пневмозащиты аналогичен внешней пневмозащите, представленной на рисунке 1, с тем отличием, что устройство пневмозащиты находится внутри резервуара и представляет собой не ТОР, а цилиндры-стаканы, открытые снизу. Цилиндрические емкости могут быть прикреплены непосредственно к стенкам или передавать нагрузку на дно резервуара посредством дополнительного крепления, так же может быть крепление к крышке резервуара. При этом расположение и форма цилиндрических емкостей пневмозащиты должны обеспечивать сохранение сжатого воздуха в полости цилиндров при колебаниях системы с учетом возможно неполной наполняемости резервуара [9, 10, 11].

По сравнению с конструкцией внутренней пневмозащиты, предложенной О.А. Савиновым, А.М. Уздиным и другими авторами в 1986 году, данное конструктивное решение имеет ряд преимуществ. При внутреннем расположении пневмозащиты проще обеспечить герметичность емкости, особенно при устройстве пневмозащиты в уже эксплуатируемых водонапорных башнях. Кроме того, конструктивные элементы пневмозащиты не подвержены внешним воздействиям, в том числе экстремальным температурам. При устройстве внешней пневмозащиты встает вопрос дополнительного утепления сообщающегося сосуда, а также ограничен выбор материалов, что ведет к дополнительным затратам. При расположении пневмозащиты внутри резервуара эти проблемы решаются, отдельного утепления устройств пневмозащиты не требуется. Главным недостатком такого решения является уменьшение полезного объема резервуара.

#### **Выбор расчетно-динамической модели водонапорной башни с внутренней пневмозащитой**

Задачей дальнейших исследований является расчет требуемого объема воздуха, находящегося в цилиндрических емкостях для пневмозащиты водонапорной башни с определенным объемом резервуара. Для этого необходимо задаться расчетно-динамической моделью и определить ее параметры.

Рассмотрим устройство пневмозащиты применительно к водонапорной башне с резервуаром объемом  $30 \text{ м}^3$ . В качестве конструкции водонапорной башни возьмем типовую башню Рожновского. Объем резервуара  $30 \text{ м}^3$ . Высота резервуара составляет  $H = 4,2 \text{ м}$ . Радиус резервуара  $R = 1,51 \text{ м}$ , высота ствола  $h = 12 \text{ м}$ .

Схема сооружения с геометрическими параметрами представлена на рисунке 4.

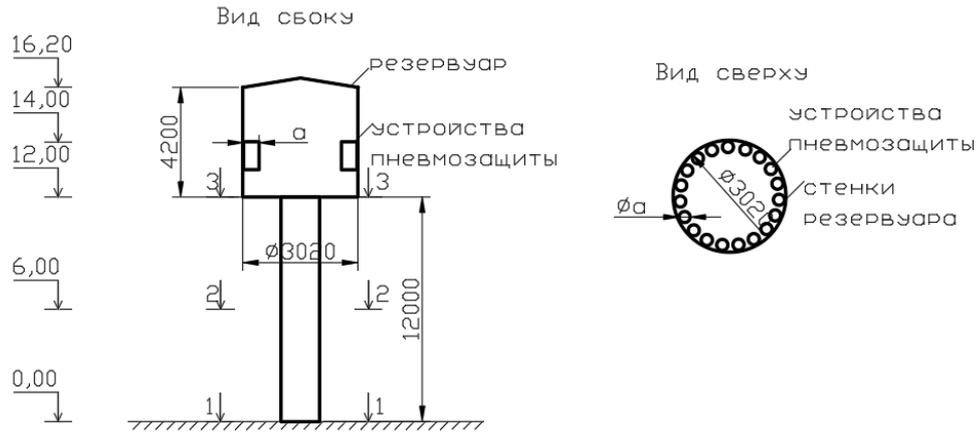


Рисунок 4 – Схема сооружения водонапорной башни объемом 30 м<sup>3</sup> с внутренней пневмозащитой

Figure 4 – Diagram of the construction of a water tower with a volume of 30 m<sup>3</sup> with internal pneumatic protection

Для расчета сейсмостойкости водонапорной башни при наличии пневмозащиты расчетно-динамическая модель должна учитывать сооружение как систему ствол-резервуар-жидкость-пневмозащита. Расчетная схема представлена на рисунке 5.

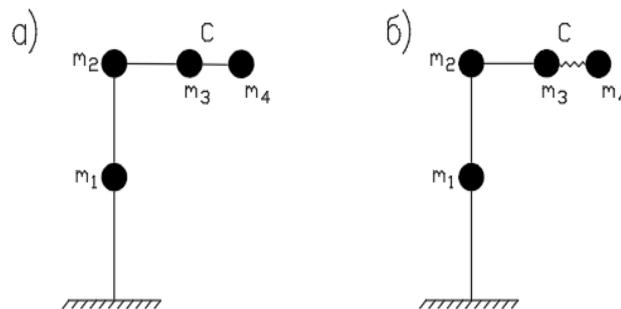


Рисунок 5 – Расчетно-динамическая модель водонапорной башни:  
 а) без пневмозащиты, б) с пневмозащитой

Figure 5 – Calculation and dynamic model of a water tower:  
 a) without air protection, b) with air protection

В  $m_1$  входит вес ствола, в  $m_2$  входит масса самого резервуара, а масса жидкости разделена на две части: присоединенную массу жидкости  $m_3$ , жестко соединенную с массой резервуара, и приведенную массу жидкости  $m_4$ , соединенную с массой резервуара упругой связью с жесткостью  $C$ . При отсутствии пневмозащиты связь  $C$  является абсолютно жесткой, то есть  $C = \infty$ . Определение параметров расчетной схемы, а именно масс  $m_3$ ,  $m_4$  и жесткости связи  $C$  выполнено с учетом гидродинамических особенностей жидкости при колебаниях согласно методике, представленной в [8].

Для последующих расчетов были заданы исходные данные представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета объема и параметров пневмозащиты

Table 1 – Initial data for calculating the volume and parameters of air protection

Название	Обозначение	Значение	Ед. изм.
<i>Площадка строительства</i>			
Сейсмичность площадки строительства	I	9	баллов
Категория грунта по сейсмическим свойствам	-	2	-
Тип основания	нескальное	-	-
Тип грунта	суглинок		
Сейсмическая жесткость	$V_s$	1000	м/с
Скорость поперечных волн	$V_p$	500	м/с
Модуль деформации основания	E	3000	Па
<i>Водонапорная башня</i>			
Высота ствола башни	h	12	м
Радиус резервуара	R	1,51	м
Высота резервуара	H	4,2	м
Ускорение свободного падения	g	9,81	м/с <sup>2</sup>
Плотность воды	$\rho_0$	1000	кг/м <sup>3</sup>
Масса ствола	$m_1$	6000	кг
Масса конструкции резервуара	$m_2$	4000	кг

### Расчет объемов и параметров пневмозащиты

Вычислим объем резервуара по следующей формуле (1):

$$V = \pi R^2 H, \quad (1)$$

В полости цилиндра пневмозащитной установки, находится воздух объемом  $V_3$ . Расчет гидродинамического давления на стенки резервуара предложен в работе [11]. По предложенной методике получаем объем защиты  $V_3$  по формуле (2):

$$V_3 = V \frac{gT^2}{16\pi R} \left(1 + \frac{\rho_0 H_0}{\rho H}\right), \quad (2)$$

где  $T = \frac{2\pi}{\omega_3}$  – парциальный период качки воды при наличии воздуха;

$\rho_0$  – плотность воды;

$\rho$  – плотность жидкости в резервуаре (в данном случае  $\rho_0 = \rho$ );

$H_0 = H + 10$ , высота столба воды, обеспечивающего атмосферное давление, в метрах водяного столба (1 м.в.с. =  $10^4$  Па);

$\omega_3$  – круговая частота собственных колебаний присоединенной массы  $m_3$ , вычисляемая по формуле (3).

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{a^2 P_a}{V \rho \mu_g}}, \quad (3)$$

где  $a$  – диаметр пневмозащитных цилиндров;

$P_a$  – абсолютное гидростатическое давление;

$\mu_g$  – коэффициент приведенной массы.

В полости цилиндра пневмозащитной установки, находится сжатый воздух под давлением, равным абсолютному гидростатическому давлению  $P_a$  на уровне дна бака, определяемый по формуле (4):

$$P_a = H \cdot 10 \quad (4)$$

Коэффициент приведенной массы  $\mu_g$  в соответствии с исследованиями М.М. Пейчева [11] может быть определен по формуле (5):

$$\mu_g = \frac{16}{\pi^3} \Sigma \quad (5)$$

где  $\Sigma$  определяется по формуле (6)

$$\Sigma = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin\left[\frac{(2k+1)\pi a}{2}\right]^2}{(2k+1)^3} \quad (6)$$

где  $k$  – форма колебаний жидкости.

Зная частоту собственных колебаний  $\omega_3$  присоединенной массы  $m_3$ , можно вычислить жесткость пружины  $C$ , соединяющей присоединенную массу  $m_3$  и приведенную массу  $m_4$ . Для этого предварительно определим из формул (7–8) массы  $m_3$  и  $m_4$ :

$$m_4 = V\rho g\mu_g \quad (7)$$

$$m_3 = (V\rho g + m_2) - m_4 \quad (8)$$

Таким образом можно определить численное значение  $C$  из формулы (9):

$$C = \omega_3^2 m_4 \quad (9)$$

Результаты расчетов по описанным формулам сведем в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов объемов пневмозащиты и параметров расчетной модели

Table 2 – Results of calculations of air protection volumes and parameters of the calculation model

Название	Обозначение	Значение	Единица измерения
Объем резервуара	$V$	30	$\text{м}^3$
Объем пневмозащиты	$V_3$	0,131	$\text{м}^3$
Круговая частота собственных колебаний присоединенной массы	$\omega_3$	0,369	Герц
Абсолютное гидростатическое давление на уровне дна бака	$P_a$	14,2	Па
Коэффициент приведенной массы	$\mu_g$	0,446	
Присоединенная масса	$m_3$	201	кН
Приведенная масса	$m_4$	130	кН
Жесткость пружины с пневмозащитой	$C$	1,793	Н/м
Жесткость пружины без пневмозащиты	$C$	$\infty$	Н/м

### Расчет водонапорной башни на сейсмические воздействия при устройстве пневмозащиты

Для оценки эффективности сейсмозащиты был выполнен расчет водонапорной башни без пневмозащиты и с ее устройством. Для расчета на сейсмические воздействия было использовано программное обеспечение Solution. Расчет в данном приложении ведется по модифицированной линейно-спектральной методике, учитывающей демпфирование. При этом задавалась жесткость пружины  $C$ , соединяющей массу приведенной жидкости с массой резервуара. При расчетах на сейсмические воздействия без пневмозащиты жесткость данной пружины приравнивалась к бесконечности, при наличии пневмозащиты жесткость  $C$  имеет конечное значение, определяемое расчетом и представленное в таблице 2.

Для анализа изменения динамических характеристик системы при отсутствии и при наличии пневмозащиты результаты расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики системы по формам колебаний при сейсмических воздействиях без пневмозащиты и при ее устройстве

Table 3 – Characteristics of the system according to the forms of vibrations during seismic impacts without pneumatic protection and when it is installed

№ формы	без пневмозащиты			с пневмозащитой		
	1	2	3	1	2	3
Период, с	1,131	0,087	0,058	1,739	1,095	0,085
Коэффициент неупругого сопротивления	0,075	0,069	0,051	0,242	0,083	0,069

Из таблицы видно, что при использовании пневмозащиты коэффициент неупругого сопротивления возрастает и происходит ощутимое увеличение периодов свободных колебаний системы. Для относительной оценки изменения параметров колебаний системы по каждой форме приведем таблицу 4, показывающую изменения в процентном соотношении.

Таблица 4 – Анализ изменений параметров колебаний системы с пневмозащитой, по сравнению с системой без применения пневмозащиты

Table 4 – Analysis of changes in the vibration parameters of a system with pneumatic protection, compared with a system without the use of pneumatic protection

Параметр	Изменение параметров %		
	1 форма	2 форма	3 форма
Период	45↑	92↑	32↑
Коэффициент неупругого сопротивления	70↑	17↑	26↑

Формы колебаний системы в графическом виде показаны на рисунках 6 и 7.

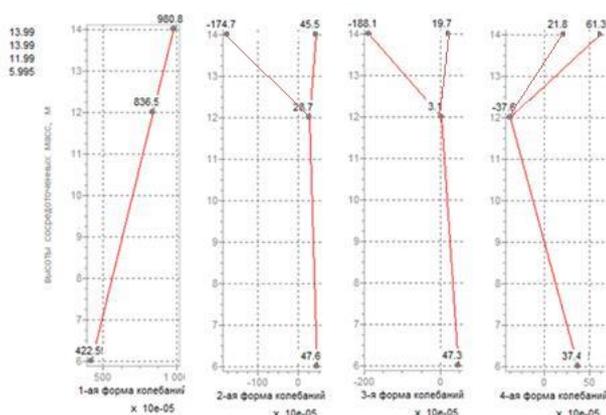


Рисунок 6 – Формы колебаний системы без пневмозащиты

Figure 6 – Waveforms of the system without pneumatic protection

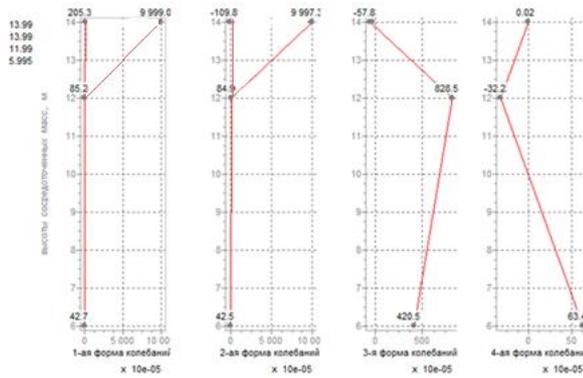


Рисунок 7 – Формы колебаний системы при устройстве пневмозащиты

Figure 7 – Vibration patterns of the system during the pneumatic protection device

Изменение основных динамических характеристик системы приводит к изменению усилий возникающих в сечениях элементов. По каждой из форм колебаний определены сейсмические силы и посчитаны усилия в наиболее характерных сечениях, представленных на рисунке 4. Результирующие усилия с учетом всех форм колебаний в характерных сечениях, приведены в таблице 5 и проиллюстрированы на рисунке 8.

Таблица 5 – Результатов расчетов усилий, возникающих при сейсмических воздействиях в системе без пневмозащиты и с ее устройством

Сечение	Отметка сечения	без пневмозащиты		с пневмозащитой	
		Изгибающий момент, М (кН·м)	Поперечная сила, Q (кН)	Изгибающий момент, М (кН·м)	Поперечная сила, Q (кН)
1-1	0,001	15 619	1 427	12 643	1 280
2-2	6,000	7 208	1 427	5 235	1 280
3-3	12,00	838	1 074	316	866
	0				

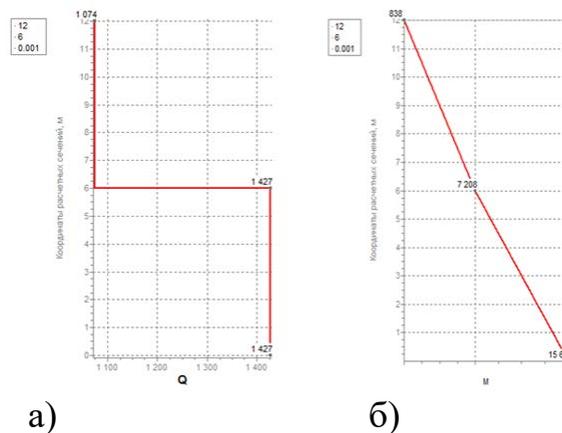


Рисунок 8 – Эпюры изгибающих моментов по высоте ствола.  
 а – без пневмозащиты; б – при ее устройстве

Figure 8 – Diagrams of bending moments along the trunk height.  
 а – without pneumatic protection; б – with its device

Относительная оценка изменения усилий в рассматриваемых сечениях системы приведена в таблице 6.

Таблица 6 – Анализ изменений усилий, действующих на систему при сейсмических воздействиях

Table 6 – Analysis of changes in the forces acting on the system during seismic impacts

№ сечения	Отметка сечения	Изменение параметров, %	
		Изгибающий момент, М	Поперечная сила, Q
1-1	0,001	20↓	11↓
2-2	6,000	28↓	11↓
3-3	12,000	53↓	20↓

В связи с значительным уменьшением значений усилий можно сделать вывод, что сейсмостойкость конструкции повышена благодаря применению пневмозащиты.

### Выводы

Рассмотрена идея обеспечения сейсмостойкости водонапорной башни путем применения внутренней пневмозащиты. Внутренняя пневмозащита позволяет не предусматривать дополнительное утепление пневмозащитных установок, так как они находятся внутри резервуара. Кроме того, такое решение облегчает эксплуатацию водонапорной башни, снабженной пневмозащитой, так как она защищена от внешних воздействий.

Выполнен численный расчет объемов пневмозащиты и численных значений параметров расчетно-динамической модели конструкции водонапорной башни с внутренней пневмозащитой применительно к башне А.А. Рожновского.

Проведен сравнительный анализ колебаний водонапорной башни без пневмозащиты и при ее наличии. Определены динамические характеристики системы и усилия в стволе башни при сейсмических воздействиях. Результаты показывают, что при наличии пневмозащиты изменяются динамические характеристики системы, что приводит к снижению сейсмических нагрузок и значительному уменьшению усилий в конструкции водонапорной башни.

Данное конструктивное решение пневмозащиты легко может быть реализовано в эксплуатируемых водонапорных башнях, как в башне А.А. Рожновского, рассмотренной в ходе исследований, так и в других конструкциях водонапорных башен.

Устройство пневмозащиты, предложенное в работе позволит обеспечить сейсмостойкость водонапорных башен в тех районах, где сейсмичность площадки строительства была повышена вследствие пересмотра карт общего сейсмического районирования.

### Список литературы

1. Котов В.И. Индустриальные решения стволов водонапорных башен. *Промышленное строительство инженерных сооружений*. 1989. №4. С. 34–35.

2. Спивак Е.С. К вопросу о динамическом воздействии сейсмозврывных волн на башенное сооружение. Расчет строительных конструкций. Киев. 1970. С 23–30.
3. Николаенко Н.А. Динамика и сейсмостойкость конструкций, несущих резервуары. М.: Гостройиздат, 1962. 88 с.
4. Айзенберг Я.М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. М.: Стройиздат, 1976. 229 с.
5. Полюх В.С. Водонапорные башни. Проектирование. М.: Стройиздат, 1980. 351 с.
6. Нискин Э.А. Расчет стальных вертикальных резервуаров на сейсмические воздействия. М.: ВПИ Теплоэлектропроект, 1998, 189 с.
7. Савинов О.А., Уздин А.М. Назначение уровня расчетного воздействия при оценке сейсмостойкости крупных гидротехнических сооружений // *Экспресс-информация ВНИИИС. Серия 14. Сейсмостойкое строительство*. 1980, Выпуск 2, 21–25, с. 25.
8. Савинов О.А., Шейнина С.И. К анализу сейсмозащитных свойств воздушной завесы. Известия ВНИИГ. 1980, 1. 140, с. 84–89.
9. Шейнина С.И. Эффективность воздушной завесы при воздействии переменного по времени давления на поверхность водоема // *Изв. ВНИИИГ им. Б.Е. Веденеева*. 1984. Т.170 С. 46–53.
10. Пейчев М.М. Перспективы строительства водонапорных башен в сейсмических районах // *Проектирование и расчет строительных конструкций*. Л., 1986. С. 45–51.
11. Уздин А.М., Пейчев М.М., Пейчева Ю.С. Расчет водонапорных башен на сейсмические воздействия // *Строительство в особых условиях // Экспресс информация ВНИИИС. Серия 14, 1986, выпуск 2, с. 21–27*.
12. Уздин А.М., Елизаров С.В., Белаш Т.А. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений: учебное пособие. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». 2012. 501 с.
13. Патент №13599428 СССР.: Водонапорная башня: заявл. 04.04.1986 опубл. 15.12.1987: бюл. № 46: Савинов О.А., Уздин А.М., Пейчев М.М., 2 л.: ил.

## References

1. Kotov V.I. Industrial solutions of trunks of water towers. *Industrial construction of engineering structures*. 1989, no. 4, pp. 34–35 [In Russian]
2. Spivak E.S. On the issue of the dynamic effect of seismic waves on a tower structure. *Calculation of building structures*. Kiev, 1970, pp. 23–30 [In Russian]
3. Nikolaenko N.A. Dynamics and seismic resistance of structures bearing tanks. М.: Gostroizdat, 1962, 90, p. 88 [In Russian]
4. Eisenberg J.M. Structures with switching connections for seismic areas М.: Stroyizdat, 1976. 229 p. [In Russian]
5. Polyukh V.S. Water towers. Designing. / V.S. Polyukh, М.: Stroyizdat, 1980, 351 p. [In Russian]
6. Niskin E.A. Calculation of steel vertical tanks for seismic impacts. М.: VPI Teploelectroproekt, 1998, 189 p. [In Russian]
7. Savinov O.A., Uzdin A.M. Assignment of the level of calculated impact in the assessment of seismic resistance of large hydraulic structures. *Express-information VNIIS. Series 14. Earthquake-resistant construction*, 1980, Issue 2, pp. 21–25 [In Russian]

8. Savinov O.A., Sheinina S.I. On the analysis of the seismic properties of the air curtain. *Izvestiya VNIIG*, 1980, 1. 140, pp. 84–89 [In Russian]
9. Sheinina S.I. The effectiveness of an air curtain under the influence of time–varying pressure on the surface of a reservoir. *Izv. VNIIG named after B.E. Vedeneev*. 1984, vol.170, pp. 46–53 [In Russian]
10. Peychev M.M. Prospects for the construction of water towers in seismic areas. *Design and calculation of building structures*. L., 1986, pp.45–51 [In Russian]
11. Uzdin A.M., Peychev M.M., Peycheva Yu.S. Calculation of water towers for seismic impacts. *Construction in special conditions. Express information of VNIIS*. Series 14, 1986, Issue 2, pp. 21–27 [In Russian]
12. Uzdin A.M., Elizarov S.V., Belash T.A. Earthquake–resistant structures of transport buildings and structures: textbook. M.: FSBEI "Educational and Methodological Center for Education in Railway transport". 2012. 501 p.
13. Patent No. 13599428 USSR.: Water tower: application 04.04.1986 publ. 15.12.1987: bul. No. 46: Savinov O.A., Uzdin A.M., Peychev M.M., 2 l.: ill.

### **Информация об авторах**

**Сабирова Ойпошша Бахтияровна**, магистр, Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I (ПГУПС). Санкт-Петербург, Российская Федерация [sabirovaanna95@ya.ru](mailto:sabirovaanna95@ya.ru)

**Oyposhsha B. Sabirova**, magistr, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS). St. Petersburg, Russian Federation

**Зенченкова Диана Вениаминовна**, к.т.н., доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I (ПГУПС). Санкт-Петербург, Российская Федерация [dvz2012@mail.ru](mailto:dvz2012@mail.ru)

**Diana V. Zenchenkova**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of Department Building structures, buildings and structures Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University (PGUPS). St. Petersburg, Russian Federation