

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-3-60-69

^{1,*}Серых И.Р., ¹Чернышева Е.В., ²Серых В.Д.¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

*E-mail: inna_ad@mail.ru

РАСЧЕТ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ОПАСНОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБЪЕКТА ПРИ ВНУТРЕННЕМ ВЗРЫВЕ

Аннотация. При проектировании опасных производственных объектов агропромышленных комплексов, имеющих класс опасности, следует огромное внимание уделять безопасности производства, предусматривая любые негативные последствия. Несоблюдение правил может грозить серьезными, а зачастую неисправимыми последствиями.

В материалах статьи изложен один из этапов обследования подсилосного этажа здания элеватора 1912 года постройки, а именно расчет несущих конструкций на внутренний взрыв.

Взрыв внутри производственных помещений элеватора чаще всего приводит к тяжелейшим последствиям, поскольку под действием давления взрыва происходит разрушение несущих конструкций, деформируются или полностью разрываются выпускной конус. При взрыве пылевоздушной смеси ударная волна легко перебрасывается на смежные производственные помещения, лестничную клетку, вентиляционные трубы, воздухопроводы и др. Именно поэтому при проектировании зданий для взрывоопасных производств ключевым требованием является обеспечение их целостности при расчетных взрывных воздействиях. Это означает, что основные несущие и ограждающие конструкции не должны разрушаться. Допускаются лишь временные, локальные повреждения, которые не приводят к необратимой потере прочности, жесткости или устойчивости, и не снижают эксплуатационные характеристики здания.

Для защиты зданий и сооружений от разрушительных последствий внутреннего взрыва необходимо учитывать два ключевых аспекта при проектировании взрывоустойчивых конструкций. Во-первых, крайне важно снизить избыточное давление, которое неизбежно возникает при взрыве. Во-вторых, необходимо усилить конструкции, чтобы они могли выдержать нагрузки, создаваемые взрывной волной. Только комплексный подход, сочетающий снижение давления и повышение прочности, позволит разработать эффективные решения для обеспечения безопасности здания при внутреннем взрыве.

Результаты, изложенные в статье, могут представлять интерес для специалистов экспертных организаций, которые занимаются экспертизой опасных производственных объектов с целью оценки фактического состояния их конструктивных элементов.

Ключевые слова: внутренний взрыв, коэффициент динамичности, предельное состояние.

Введение. При проектировании опасных производственных объектов агропромышленных комплексов, имеющих класс опасности, следует огромное внимание уделять безопасности производства, предусматривая любые негативные последствия. Несоблюдение правил может грозить серьезными, а зачастую неисправимыми последствиями [1–3].

Элеваторы, где хранится и перерабатывается зерно и другие растительные культуры, представляют собой объекты повышенной опасности. Это связано с тем, что в процессе работы неизбежно образуется взрывоопасная пыль, состоящая из органических частиц. Эта пыль, смешиваясь с воздухом, создает легковоспламеняемую смесь. Источником воспламенения может стать искра, возникающая при трении зерна о зерно, о стенки оборудования или о рабочие части машин. Именно поэтому элеваторы классифициру-

ются как объекты III класса опасности, требующие особого внимания к мерам безопасности. Опасные пылевоздушные смеси могут скапливаться не только в цехах, но и внутри аспирационных систем, транспортных механизмов и технологического оборудования. Также не стоит забывать о том, что растительное сырье (рожь, пшеница, овес и др.) при длительном хранении в силосах элеватора может подвергаться увлажнению, самосогреванию, а затем и самовозгоранию в результате выделения горючих газов в процессе брожения и термоокислительной деструкции. Образующиеся при этом горючие газы, могут скапливаться в свободных помещениях силосов и стать источником возгорания.

Взрыв внутри силоса чаще всего приводит к тяжелейшим последствиям, поскольку под действием давления взрыва происходит разрушение несущих конструкций (перекрытий, стен, ко-

лонн), деформируется или полностью разрывается выпускной конус. При взрыве пылевоздушной смеси ударная волна легко перебрасывается на смежные производственные помещения, лестничную клетку, вентиляционные трубы, воздуховоды и др. Именно поэтому при проектировании зданий для взрывоопасных производств ключевым требованием является обеспечение их целостности при расчетных взрывных воздействиях. Это означает, что основные несущие и ограждающие конструкции не должны разрушаться. Допускаются лишь временные, локальные повреждения, которые не приводят к необратимой потере прочности, жесткости или устойчивости, и не снижают эксплуатационные характеристики здания. Кроме того, возможность последующего восстановления таких повреждений не должна сопровождаться значительными материальными затратами.

К одним из наиболее тяжелых последствий могут привести внутренние взрывы на элеваторах старой постройки, поскольку в большинстве случаев эффективность средств взрывозащиты производственного оборудования и самого здания значительно снижена по отношению к современным требованиям нормативно-технической документации. Как известно, в состав элеватора входят следующие сооружения: рабочее здание, силосные корпуса, помещение для приемки зерна с транспорта и зерносушилка. Если взрыв произойдет в рабочем здании, то ударная волна в первую очередь распространится на лестничную клетку, а следом в другие помещения этого сооружения. А теперь представим себе взрыв на подсилосном этаже зернохранилища. Мощная взрывная волна мгновенно распространится вверх, вырываясь на первый этаж. Но это только начало. Дальше она легко проникнет в подземные галереи, ведущие к помещениям, где зерно выгружают из вагонов и грузовиков. В этих замкнутых пространствах взрывная волна может нанести серьезный ущерб. А если взрыв произойдет непосредственно в силосе, заполненном зерном? Здесь сценарий еще более опасен. Представьте себе: взрывная волна вместе с продуктами горения, словно гейзер, вырываются на надсилосный этаж. И если в соседних силосных корпусах есть открытые проемы, то пламя и дым мгновенно распространятся и туда, создавая угрозу для всего зернохранилища. В случае взрыва в пустом силосе, высока вероятность распространения пламени и продуктов взрыва ниже, в подсилосный этаж.

Анализ результатов расследования аварий на элеваторах [4–9] дает возможность обобщить

«благоприятные» условия возникновения взрывов, связанные с конструктивными особенностями подобного рода сооружений:

- объединение производственных помещений между собой посредством галерей и тоннелей (при отсутствии перегородок);
- наличие междуэтажных проемов;
- наличие вентиляционных отверстий между силосами;
- наличие воздуховодов воздушного отопления, связывающих между собой два и более этажей;
- отсутствие тамбуров (шлюзов) между лестничными клетками и производственными помещениями;
- незакрытые щели и отверстия в несущих стенах и перегородках;
- недостаточное количество оконных проемов
- отсутствие или недостаточное количество легкобрасываемых конструкций, обеспечивающих быстрый сброс давления при взрыве;
- устройство единого для всех силосов монолитного перекрытия, что приводит к быстрому распространению взрывной волны по всему элеватору даже, если взрыв произошел только в одном из силосов.

Если провести анализ причин взрывов на предприятиях по переработке и хранению зерна, то можно сделать вывод, что наибольшее их число вызвано неэффективными техническими средствами пожаровзрывозащиты технологического оборудования или вовсе отсутствием таковых [4]. На втором месте – недостаток или полное отсутствие технических средств пожаровзрывозащиты самих силосов. На третьем – неэффективные или отсутствующие технические средства пожаровзрывозащиты производственных помещений элеваторов. Далее по убывающей – субоптимальное объемно-планировочное решение; недостаток или полное отсутствие устройств, препятствующих распространению огня внутри помещения; недостаток или полное отсутствие технических средств, работающих на выявление и подавление очагов самовозгорания растительного сырья в силосе. При этом не стоит забывать о таких сопутствующих факторах, как повышенный уровень запыленности подобных предприятий, а также присутствие в оборудовании мелкодисперсного продукта.

Таким образом, выявленные причины, условия возникновения и развития взрывов показывают, что вероятность возникновения взрыва значительно повышается при низком уровне обеспечения пожаровзрывоопасности объекта.

В материалах статьи изложен один из этапов обследования подсилосного этажа здания элеватора 1912 года постройки (рис. 1). Здание размером в плане 39,60 на 12,55 метра. Наружные стены возведены из прочных каменных блоков природного камня – песчаника, перекрытие выполнено из монолитного железобетона, колонны – железобетонные сечением $0,85 \times 0,85$ м с шагом 3 м. Высота от пола до низа перекрытия 3,12 м.



На первом этапе для помещения подсилосного этажа элеватора по известной методике [10–14] был произведен расчет требуемой площади легкосбрасываемых конструкций, который показал, что общая площадь оконных проемов $5,5 \text{ м}^2$ меньше требуемой, равной $17,5 \text{ м}^2$, то есть обеспечить необходимую площадь остекления в качестве ЛСК не представляется возможным.

На втором этапе был выполнен расчет несущих конструкций на внутренний взрыв.



Рис. 1. Подсилосный этаж здания элеватора

Методика расчета. Методика расчета несущих конструкций здания элеватора при внутреннем аварийном взрыве пылевоздушной горючей смеси опиралась на рекомендации, изложенные в пособии [15] с учетом СП [16].

Для защиты зданий и сооружений от разрушительных последствий внутреннего взрыва необходимо учитывать два ключевых аспекта при проектировании взрывоустойчивых конструкций. Во-первых, крайне важно снизить избыточное давление, которое неизбежно возникает при взрыве. Во-вторых, необходимо усилить конструкции, чтобы они могли выдержать нагрузки, создаваемые взрывной волной. Только комплексный подход, сочетающий снижение давления и повышение прочности, позволит разработать эффективные решения для обеспечения безопасности здания при внутреннем взрыве.

Расчет несущих конструкций производится на основное и особое сочетание нагрузок. При расчете на особое сочетание нагрузок, включающее в себя статические и кратковременные динамические нагрузки от взрыва, подход несколько меняется: расчет ведется исходя из фактических значений нагрузок без увеличения на коэффициент надежности, который принимается равным единице; снеговые нагрузки исключаются из расчета, поскольку считается, что в момент взрыва

наличие снега не оказывает существенного влияния на поведение конструкции.

Расчет конструкций при особых сочетаниях нагрузок рекомендуется выполнять с применением методов динамики сооружений. Суть данного подхода заключается в использовании так называемых эквивалентных нагрузок. Под эквивалентными нагрузками подразумеваются статические нагрузки, которые приложены таким образом, чтобы создавать в конструктивных элементах внутренние усилия и перемещения, идентичные тем, которые возникают под действием динамических нагрузок.

Расчет на особое сочетание нагрузок производится по первой группе предельных состояний: по несущей способности и потере устойчивости. Причем для железобетонных конструкций используются два расчетных предельных состояния: $1a$ и $1b$. Отличительной особенностью расчетного предельного состояния $1a$ является работа конструкций в упругой стадии деформирования. При расчете по предельному состоянию $1b$ учитывают работу железобетонных конструкций в упругопластической стадии с развитием пластических деформаций в растянутой арматуре в наиболее напряженных сечениях и достижением предельных деформаций укорочения бетона сжатой зоны.

Основная часть. Рассмотрим расчет несущих конструкций подсилового этажа здания элеватора на внутренний взрыв на примере колонны, плиты перекрытия и внешней несущей стены.

При внутреннем аварийном взрыве, за счет активации различных предохранительных конструкций, происходит снижение избыточного давления. Принимаем, что это приводит к снижению давления к допустимой величине, равной $P_{\text{доп}} = 5 \text{ кПа} = 5 \text{ кН/м}^2$. Время действия давления $Q_2 = 0,2 \text{ с}$, время нарастания давления до максимальной величины $Q_1 = 0,05 \text{ с}$.

Колонны каркаса прямоугольного поперечного сечения $0,85 \times 0,85 \text{ м}$, высотой $h = 3,12 \text{ м}$, шагом – 3 м выполнены из бетона В22,5. Продольное армирование: $4\emptyset 18 \text{ А-III}$ и $4\emptyset 18 \text{ А-III}$, поперечное армирование: $2\emptyset 8 \text{ А-I}$ с шагом 400 мм . Расчетная схема приведена на рис. 2, слева.

Вес колонны составляет: $0,85 \cdot 0,85 \text{ м}^3 \cdot 12 \cdot 2300 \text{ кН/м}^3 = 5185 \text{ кг}$.

Вес участка стены в трехметровом пролете составляет: $1 \text{ м} \cdot 3,12 \text{ м} \cdot 3 \text{ м} \cdot 2300 \text{ кН/м}^3 = 21528 \text{ кг}$, а одного погонного метра 7176 кг .

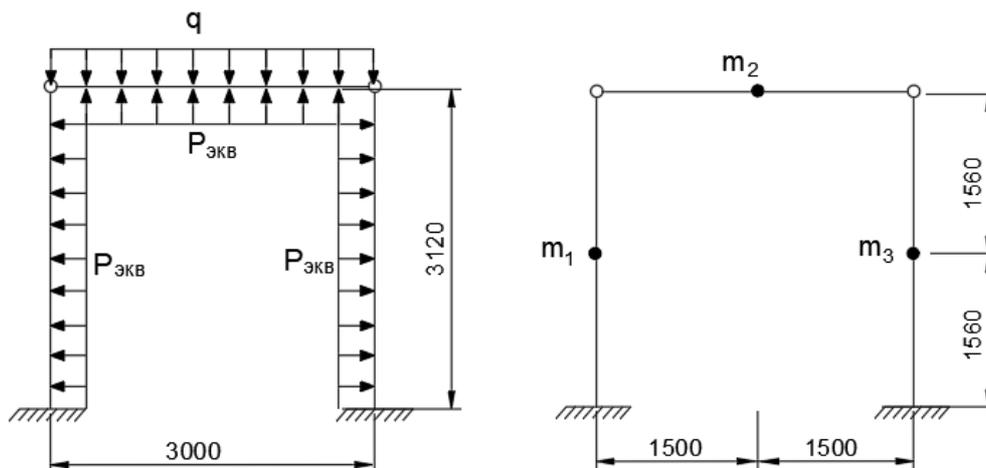


Рис. 2. К расчету поперечной рамы каркаса: слева – расчетная схема, справа – динамическая расчетная схема

Постоянная статическая нагрузка включает в себя собственный вес плиты перекрытия и вес оборудования:

$$q = 1,2 \text{ кН/м}^2 \cdot 3 \text{ м} + 24,01 \text{ кН} \cdot \frac{1,1}{3 \text{ м}} = 12,4 \text{ кН/м}.$$

На рис. 2, справа представлена динамическая расчетная схема для определения частот колебаний, на которой сосредоточенные массы m_1, m_2, m_3 равны:

$$m_2 = 12,4 \text{ кН/м} \cdot 3 \text{ м} / 9,81 \text{ м/с}^2 = 3,8 \text{ кН} \cdot \text{с}^2 / \text{м};$$

$$m_1 = m_3 = (51,85 \text{ кН} \cdot 1,1 \cdot \frac{1,56 \text{ м}}{3,12 \text{ м}} + 215,28 \text{ кН} \cdot 1,1 \cdot \frac{1,56 \text{ м}}{3,12 \text{ м}}) / 9,81 \text{ м/с}^2 = 15 \text{ кН} \cdot \text{с}^2 / \text{м}.$$

Изгибные жесткости:

$$B_1 = B_3 = 28,5 \cdot 10^6 \text{ кН/м}^2 \cdot 0,85^4 \text{ м}^4 / 12 = 1239765 \text{ кН} \cdot \text{м}^2,$$

$$B_2 = 30 \cdot 10^6 \text{ кН/м}^2 \cdot 226523 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4 = 67956,9 \text{ кН} \cdot \text{м}^2.$$

Эпюры моментов построены известными методами строительной механики и приведены на рис. 3 вместе со схемой приложения единичных

сил. Используя их, вычислим перемещения рамы:

$$\delta_{11} = \delta_{33} = \frac{1,26}{EI_z} = \frac{1,26 \text{ м}^3}{1239765 \text{ кН} \cdot \text{м}^2} = 10,21 \cdot 10^{-7} \text{ м/кН};$$

$$\delta_{22} = \frac{0,5625}{EI_z} = \frac{0,5625 \text{ м}^3}{67956,9 \text{ кН} \cdot \text{м}^2} = 82,77 \cdot 10^{-7} \text{ м/кН};$$

$$\delta_{13} = \frac{1,48}{EI_z} = \frac{1,48\text{м}^3}{1239765\text{кН} \cdot \text{м}^2} = 11,96 \cdot 10^{-7};$$

$$\delta_{12} = \delta_{23} = 0.$$

Коэффициенты β_1 и β_2 :

$$\beta_1 = 2 \cdot \delta_{11} \cdot m_1 + \delta_{22} \cdot m_2 = 62,08 \cdot 10^{-6}\text{с}^2;$$

$$\beta_2 = 2 \cdot (\delta_{11} \cdot m_1)^2 + (\delta_{22} \cdot m_2)^2 + 2\delta_{13} \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 = 0,002045\text{с}^4.$$

Частота колебаний:

$$\omega_k = \frac{\sqrt[4]{\beta_2} + \sqrt{\beta_1}}{2\sqrt{\beta_2}} = 2,44\text{с}^{-1}.$$

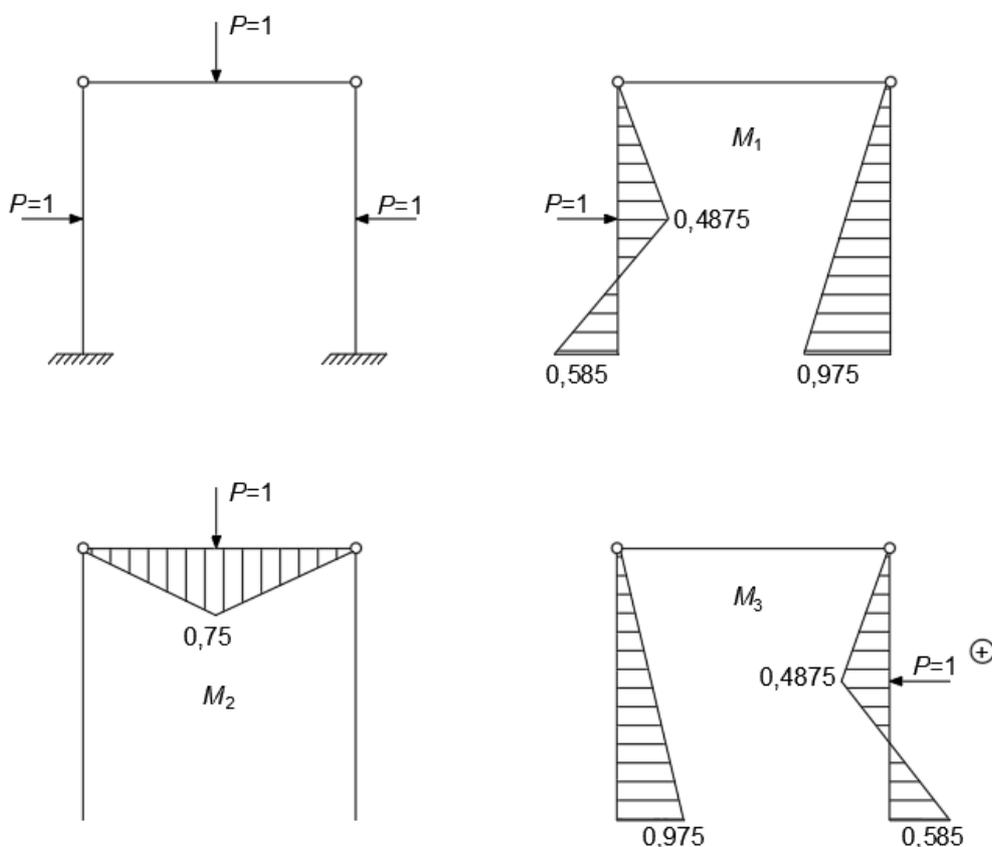


Рис. 3. Схема приложения единичных сил и эпюры моментов

Коэффициент динамичности K_d при отношении $Q_2/Q_1 = 4$ и $\omega_k \cdot Q_1 = 0,122$ путем интерполирования, получим $K_d = 1,45$.

В этом случае эквивалентная статическая нагрузка:

$$P_{\text{экв}} = P_{\text{доп}} \cdot K_d = 21,75 \text{ кН/м}.$$

Коэффициент надежности принимаем $\gamma_f = 1$.

Эпюры изгибающих моментов, поперечных и продольных сил приведены на рис. 4.

Для оценки несущей способности колонн найдем:

$$e_0 = \frac{26,5}{14,025} = 1,9\text{м};$$

$$e = 1,9 - 0,16 = 1,74\text{м};$$

$$e' = 1,9 + 0,16 = 2,06\text{м}.$$

Расчетные сопротивления бетона и арматуры:

$$R_b = 13000 \text{ кН/м}^2 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 1,25 = 19500 \text{ кН/м}^2;$$

$$R_{bt} = 975 \text{ кН/м}^2 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 1,25 = 1462,5 \text{ кН/м}^2;$$

$$R_s = 355000 \text{ кН/м}^2 \cdot 1 \cdot 1,25 = 443750 \text{ кН/м}^2;$$

$$R_{sc} = 365000 \text{ кН/м}^2 \cdot 1 \cdot 1,25 = 456250 \text{ кН/м}^2.$$

Поскольку $R_{sc} = 456250 \text{ кН/м}^2 > 440000 \text{ кН/м}^2$, то окончательно принимаем $R_{sc} = 440000 \text{ кН/м}^2$.

Площадь арматуры $A_s = 25,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ (здесь $A_s(4\phi 18) = 10,1736 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $A_s(4\phi 22) = 15,1976 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$).

При подстановке значений в формулу для определения высоты сжатой зоны, она получается отрицательной:

$$Ne' = 14,025 \text{ кН} \cdot 2,06 \text{ м} = 28,9 \text{ кН} \cdot \text{м} < 890,43 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

$$x = \frac{R_s \cdot A_s - R_{sc} A'_s - N}{R_b b} < 0,$$

тогда

$$R_s \cdot A_s (h_0 - a') = 890,43 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Таким образом, можно сделать вывод, что колонна не разрушается по нормальному сечению, потому что:

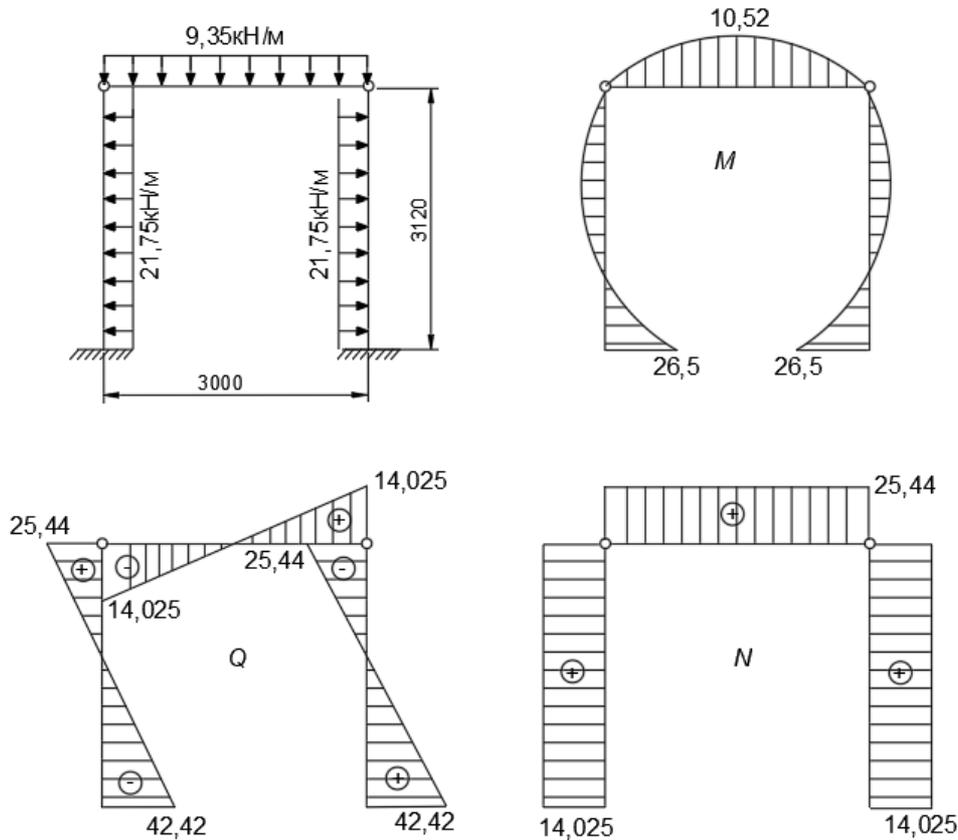


Рис. 4. Эпюры моментов M , поперечных сил Q , продольных сил N в сечениях рамы

Поперечное армирование колонны выполнено из 2 ϕ 8А-I с шагом 400 мм,

$A_{sw} = 1,01 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Расчетное сопротивление поперечной арматуры:

$$R_{sw} = 225000 \text{ кН/м}^2 \cdot 1 \cdot 1,25 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 1 = 243000 \text{ кН/м}^2.$$

Расчет элементов конструкции на действие поперечной силы производим по формуле:

$$Q = 0,3 \cdot \varphi_{w1} \cdot \varphi_{B1} \cdot R_b \cdot b \cdot h_0 = 3315 \text{ кН},$$

где коэффициенты, входящие в формулу равны:

$$\alpha = \frac{E_s \gamma}{E_b} = 8,47; \mu_w = A_{sw}/bs = 1,4 \cdot 10^{-4}; \varphi_{w1} = 1 + 5\alpha\mu_w = 1,01; \varphi_{B1} = 1 - \beta R_b = 0,805.$$

Следовательно, прочность колонны по наклонной полосе между наклонными трещинами достаточна для восприятия нагрузок от взрыва, так как

$$Q = 42,42 \text{ кН} < 3315 \text{ кН}.$$

Длина проекции наиболее опасного наклонного сечения на продольную ось элемента:

$$C = C_{max} = \frac{\varphi_{B2}}{\varphi_{B3}} h_0 = 2,73 \text{ м},$$

где $\varphi_{B2}, \varphi_{B3}$ — коэффициенты, учитывающие влияние вида бетона:

$$\varphi_n = -0,2 \frac{N}{R_{bt} b h_0} = -0,004,$$

$$\varphi_f = 0,75 \frac{(b'_f - b)h'_f}{bh_0} = 0.$$

Поперечное усилие, воспринимаемое бетоном:

$$Q_b = \frac{\varphi_{B2}(1 + \varphi_f + \varphi_n)R_{bt}bh_0^2}{c} = 407 \text{ кН}.$$

Усилие в хомутах на единицу длины элемента:

$$q_{sw} = \frac{R_{sw}A_{sw}}{s} = 61,36 \text{ кН/м}.$$

Так как $c_0 = 4,25 \text{ м} > c = 2,73 \text{ м} > 2h_0 = 2 \cdot 0,82 \text{ м} = 1,64 \text{ м}$, то принимаем $c_0 = 1,64 \text{ м}$.

Поперечное усилие:

$$Q_{sw} = q_{sw} \cdot c_0 = 100,63 \text{ кН},$$

где c_0 принимается равным $2h_0 = 1,64 \text{ м}$.

$$Q_{max} = 42,42 \text{ кН} < Q_b + Q_{sw} = 507,63 \text{ кН},$$

следовательно, колонна по наклонному сечению не разрушится.

Выполним расчет плиты по предельному состоянию 1б.

Поскольку в полке плиты расположена арматура А-III и ВР-I, отношение изгибных жесткостей примем как для арматуры А-III по его наибольшему значению 0,3, то есть:

$$B = 78150,435 \text{ кН} \cdot \text{м}^2 \cdot 0,3 = 23445,13 \text{ кН} \cdot \text{м}^2.$$

$$\omega_k = \frac{\alpha^2}{\ell_0^2} \sqrt{\frac{B}{m_k}} = 150c^{-1}.$$

Коэффициент динамичности K_d при отношении $Q_2/Q_1 = 4$ и $\omega_k \cdot Q_1 = 7,5$ получим $K_d = 1,24$.

Эквивалентная статическая нагрузка:

$$P_{\text{эКВ}} = 5 \text{ кН/м}^2 \cdot 3 \text{ м} \cdot 1,24 = 18,6 \text{ кН/м}.$$

$$\varphi_n = \frac{R_d h_k \sqrt{h/y_0}}{E_k y_0} = 5,6 \cdot 10^{-4};$$

$$\varphi_{max} = \frac{f_{max}(t) \xi P A_5}{A_4} - \frac{R_1}{A_4} (1,5h - 3y_0) = 5,3 \cdot 10^{-4},$$

где R_d – расчетное динамическое сопротивление сжатию кладки; h_k – высота ряда кладки; h – толщина кладки; y_0 – высота сжатой зоны кладки в сечении с трещиной; E_k – начальный модуль деформации кладки; $f_{max}(t)$ – функция времени; ξ , A_4 , A_5 – коэффициенты, принимаемые согласно [12]; R_1 – вес, расположенных выше стен; P – давление на стену при взрыве.

Следовательно, стена по предельному состоянию 1б не разрушится, но скорее всего получит повреждения.

Согласно загрузки плиты перекрытия (рис. 1, слева) величина изгибающего момента в середине пролета составляет $M = \frac{(18,6-12,4)3^2}{8} = 7 \text{ кН} \cdot \text{м}$, что меньше данной величины при действии взрывной нагрузки в направлении снизу вверх:

$$7 \text{ кН} \cdot \text{м} < 27,7 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

следовательно, плита перекрытия при расчете по предельному состоянию 1б не разрушается.

При расчете каменной стены, не имеющей продольного армирования, на воздействие динамических нагрузок принимаются следующие допущения:

1. расчетная схема стены принимается в виде балки, свободно опирающейся в уровне перекрытия;
2. действующая горизонтальная динамическая нагрузка распределена по высоте стены равномерно.

Согласно методике, изложенной в [15], считается, что горизонтальная трещина разбивает стену на два элемента, которые могут одинаково вращаться относительно друг друга.

При достижении требуемого предельного состояния материал кладки сжатой зоны начинает разрушаться в сечении с раскрытой горизонтальной трещиной. Это происходит в момент получения стеной наибольших перемещений. Таким образом, условие прочности стены представляет собой выражение:

$$\varphi_{max} \leq \varphi_n,$$

где φ_{max} – максимальный угол поворота блока; φ_n – половина предельного угла раскрытия шва (трещины).

По результатам расчета эти величины получились очень близки по значению:

Выводы. Поскольку фактическая площадь ЛСК подсилоного этажа оказалась меньше требуемой, а увеличение этой площади не представляется возможным, то было принято решение выполнить расчет конструкций на внутренний взрыв, который показал, что прочность конструкций достаточна для восприятия нагрузок от взрыва. Однако в наружной каменной стене возможны повреждения.

Несмотря на это, для сброса давления было рекомендовано либо увеличить площадь окон-

ных проемов до требуемой, либо при невозможности устройства дополнительных проемов предусмотреть устройство взрывных пружинных клапанов.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Системные аварии и катастрофы в техно-сфере России. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2012. 308 с.

2. Серых И.Р., Чернышева Е.В., Дегтярь А.Н., Черноситова Е.С., Чернышева А.С. Экспертиза промышленной безопасности здания цеха ВЖС Шебекинского химического завода с целью оценки технического состояния конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 9. С. 55–61. DOI: 10.12737/article_5bab4a1cacc902.46271253.

3. Серых И.Р., Чернышева Е.В., Дегтярь А.Н. Обеспечение условий жизнедеятельности персонала в рамках обследования несущих конструкций производственных помещений // Известия тульского государственного университета. Науки о земле. 2024. № 3. С. 220–229.

4. Семенов Л.И. Теслер Л.А. Взрывобезопасность элеваторов, мукомольных и комбикормовых заводов. М.: Агропромиздат, 1991. 367 с.

5. Вишняк М.Н., Мельберг А.А., Литвиненко И.С., Мальцев А.Е., Чемисова К.Е. Оценка вероятностного сценария воздействия и развития аварии при образовании пылевоздушной смеси в механизированном агропромышленном производстве // Естественные и технические науки. 2023. № 12 (187). С. 392–396. DOI: 10.25633/ETN.2023.12.40

6. Бареев В.И., Голец Е.А. Анализ систем обеспечения пожарной безопасности объекта зерноперерабатывающего комплекса // Труды

Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 68. С. 174–178. DOI: 10.21515/1999-1703-68-174-178

7. Симин В., Уваров Е., Машкин А., Колыхалов В. Повышение взрывобезопасности производственных операций при переработке и хранении зерна // ТехНадзор. 2015. № 12 (109). С. 526–527.

8. Аушев И.Ю., Иванистов А.С. Обеспечение взрывобезопасности объектов хранения и переработки зерна на примере КУП «Горецкий элеватор» // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2025. Т. 9. № 1. С. 109–118. DOI: 10.33408/2519-237X.2025.9-1.109

9. Васильев Я.Я., Семенов Л.И. Взрывобезопасность на предприятиях по хранению и переработке зерна. М.: Колос, 1983. 224 с.

10. Серых И.Р., Чернышева Е.В., Серых В.Д. Легкосбрасываемые конструкции для помещения котельной // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. Т. 10. № 9. С. 8–15. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-8-15

11. Касперов Г.И., Полевода И.И., Миканович А.С. Расчет площади разрушаемых легко-сбрасываемых конструкций // Вестник командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. 2005. № 2(2). С. 64–69.

12. Чикин А.Ю., Лавыгина О.Л., Кузнецова О.Н., Степанов И.Г. Разработка предложений по модернизации легкосбрасываемых оконных конструкций при их использовании на взрывоопасных объектах // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2020. Т. 10. № 4 (35). С. 610–617.

13. Корольченко О.Н., Корольченко А.Д. Определение давления вскрытия легкосбрасываемых конструкций с учетом ветровых нагрузок // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 7. С. 914–921.

14. Горев В.А., Корольченко А.Д. Влияние легкосбрасываемых конструкций на избыточное давление при взрыве в помещении // Пожаро-взрывобезопасность 2022. Т. 31. № 3. С. 12–23.

15. Пособие по обследованию и проектированию зданий и сооружений, подверженных воздействию взрывных нагрузок, М.: АО «ЦНИИ-Промзданий», 2000. 122 с.

16. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Москва. 2018

Информация об авторах:

Серых Инна Робертовна, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и сопротивлений материалов. E-mail: inna_ad@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Чернышева Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры стандартизации и управления качеством. E-mail: bellena_74@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Серых Валерия Дмитриевна, бакалавр. E-mail: luruler44@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, корп. 1.

Поступила 04.10.2025 г.

© Серых И.Р., Чернышева Е.В., Серых В.Д., 2026

^{1,*}Serykh I.R., ¹Chernyshova E.V., ²Serykh V.D.

¹Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

²National Research Moscow State University of Civil Engineering

*E-mail: inna_ad@mail.ru

CALCULATION OF LOAD-BEARING STRUCTURES OF HAZARDOUS INDUSTRIAL FACILITY IN CASE OF INTERNAL EXPLOSION

Abstract. When designing hazardous production facilities of agro-industrial complexes with a hazard class, great attention should be paid to production safety, providing for any negative consequences. Non-compliance with the rules can threaten with gray, and often incorrigible consequences.

The materials of the article set out one of the stages of the survey of the sub-silo floor of the elevator building built in 1912, namely, the calculation of load-bearing structures for an internal explosion.

Explosion inside the production premises of the elevator most often leads to severe consequences, since under the influence of the explosion pressure the structural structures are destroyed, the outlet cone is deformed or completely broken. When a dust-air mixture explodes, the shock wave is easily transferred to adjacent production premises, a staircase, ventilation pipes, air ducts, etc. That is why when designing buildings for explosive production, the key requirement is to ensure their integrity under design explosive effects. This means that the main supporting and enclosing structures should not be destroyed. Only temporary, local damages are allowed, which do not lead to irreversible loss of strength, stiffness or stability, and do not reduce the operational characteristics of the building.

To protect buildings and structures from the destructive effects of an internal explosion, two key aspects must be taken into account when designing explosion-proof structures. Firstly, it is extremely important to reduce the excess pressure that inevitably arises during an explosion. Secondly, it is necessary to strengthen the structures so that they can withstand the loads created by the blast wave. Only a comprehensive approach, combining pressure reduction and strength enhancement, will allow the development of effective solutions to ensure the safety of the building in the event of an internal explosion.

The results set out in the article may be of interest to specialists of expert organizations who are engaged in the examination of hazardous production facilities in order to assess the actual state of their structural elements.

Keywords: internal explosion, dynamic factor, limit state.

REFERENCES

1. Vorob'ev Y.L., Akimov V.A., Sokolov Y.I. Systemic accidents and disasters in the technosphere of Russia [Sistemnye аварии i katastrofy v tekhnosfere Rossii]. M: FGBU VNII GOChS (FC), 2012. 308 p. (rus)
2. Seryh I.R., Chernysheva E.V., Degtyar A.N., Chernositova E.S., Chernysheva A.S. Industrial safety expert review of the building of the WBS shop of the Shebekinsky chemical plant in order to assess the technical condition of the structures [Ekspertiza promyshlennoj bezopasnosti zdaniya cekha VZhS Shebekinskogo himicheskogo zavoda s cel'yu ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya konstrukcij]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 9. Pp. 55–61. DOI: 10.12737/article_5bab4a1cacc902.46271253. (rus)
3. Seryh I.R., Chernysheva E.V., Degtyar A.N. Provision of personnel living conditions within the framework of inspection of load-bearing structures of production premises [Obespechenie uslovij zhiznedeyatel'nosti personala v ramkah obsledovaniya nesushchih konstrukcij proizvodstvennyh pomeshchenij]. Izvestiya tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle. 2024. No. 3. Pp. 220–229. (rus)
4. Semenov L.I. Tesler L.A. Explosion safety of elevators, flour mills and feed mills [Vzryvobezopasnost' elevatorov, mukomol'nyh i kombikormovyh zavodov]. M.: Agropromizdat, 1991. 367 p. (rus)
5. Vishnyak M.N., Mel'bert A.A., Litvinenko I.S., Mal'cev A.E., Chemisova K.E. Assessment of the probabilistic scenario of the impact and development of an accident during the formation of a dust-air mixture in mechanized agro-industrial production [Ocenka veroyatnostnogo scenariya vozdeystviya i razvitiya аварии pri obrazovanii pylevozdushnoj smesi v mekhanizirovannom agropromyshlennom proizvodstve]. Estestvennye i tekhnicheskie nauki.

2023. No. 12 (187). Pp. 392–396. DOI: 10.25633/ETN.2023.12.40. (rus)

6. Bareev V.I., Golec E.A. Analysis of the grain processing facility fire safety systems [Analiz sistem obespecheniya pozharnoj bezopasnosti ob"ekta zernopererabatyvayushchego kompleksa]. Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo univer-siteta. 2017. No. 68. Pp. 174–178. DOI: 10.21515/1999-1703-68-174-178. (rus)

7. Simin V., Uvarov E., Mashkin A., Kolyhalov V. Improvement of explosion safety of production operations during grain processing and storage [Povyshenie vzryvobezopasnosti proizvodstvennyh operacij pri pererabotke i hranenii zerna]. TekhNadzor. 2015. No. 12 (109). Pp. 526–527. (rus)

8. Aushev I.Yu., Ivanistov A.S. Ensuring explosion safety of grain storage and processing facilities using the example of the Goretsky Elevator [Obespechenie vzryvobezopasnosti ob"ektov hraneniya i pe-rerabotki zerna na primere KUP "Goreckij elevator"]. Vestnik Universiteta grazhdanskoj zashchity MChS Belarusi. 2025. Vol. 9. No. 1. Pp. 109–118. DOI: 10.33408/2519-237X.2025.9-1.109. (rus)

9. Vasil'ev Ya.Ya., Semenov L.I. Explosion safety at grain storage and processing facilities [Vzryvobezopasnost' na predpriyatiyah po hraneniyu i pererabotke zerna]. M.: Kolos, 1983. 224 p. (rus)

10. Seryh I.R., Chernysheva E.V., Degtyar A.N. Easily expandable structures for boiler room [Legkosbrasyvaemye konstrukcii dlya pomeshcheniya kotel'noj]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. Vol. 10. No. 9. Pp. 8–15. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-8-15. (rus)

11. Kasperov G.I., Polevoda I.I., Mikanovich A.S. Calculation of the area of destructible easily removable structures [Raschet ploshchadi razrushaemyh legkosbrasyvaemyh konstrukcij]. Vestnik komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'. 2005. No. 2(2). Pp. 64–69. (rus)

12. Chikin A.Yu., Lavygina O.L., Kuznecova O.N., Stepanov I.G. Development of proposals for modernization of easily expandable window structures when they are used in explosive facilities [Razrabotka predlozhenij po modernizacii legkosbrasyvaemyh okonnyh konstrukcij pri ih ispol'zovanii na vzryvoopasnyh ob"ektah]. Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'. 2020. Vol. 10. No. 4 (35). Pp. 610–617. (rus)

13. Korol'chenko O.N., Korol'chenko A.D. Determination of the opening pressure of easily jettison structures taking into account wind loads [Opredelenie davleniya vskrytiya legkosbrasyvaemyh konstrukcij s uchetom vetrovyh nagruzok]. Vestnik MGSU. 2022. Vol. 17. No. 7. Pp. 914–921. (rus)

14. Gorev V.A., Korol'chenko A.D. Impact of easily jettison structures on overpressure in case of explosion in the room [Vliyanie legkosbrasyvaemyh konstrukcij na izbytochnoe davlenie pri vzryve v pomeshchenii]. Pozharovzryvobezopasnost'yu 2022. Vol. 31. No. 3. Pp. 12–23. (rus)

15. Manual for survey and design of buildings and structures exposed to explosive loads [Posobie po obsledovaniyu i proektirovaniyu zdaniy i sooruzhenij, podverzhennyh vozdeystviyu vzryvnyh nagruzok]. M.: AO «CNIIPromzdanij», 2000. 122 p. (rus)

16. SP 63.13330.2018 Concrete and reinforced concrete structures. [Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii]. Moskva. 2018. (rus)

Information about the authors

Serykh, Inna R. PhD, Assistant professor. E-mail: inna_ad@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Chernyshova, Elena V. PhD, Assistant professor. E-mail: bellena_74@mail.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Serykh, Valeriya D. Bachelor student. E-mail: luruler44@gmail.com. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26.

Received 04.10.2025

Для цитирования:

Серых И.Р., Чернышева Е.В., Серых В.Д. Расчет несущих конструкций опасного производственного объекта при внутреннем взрыве. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 3. С. 60–69. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-3-60-69

For citation:

Serykh I.R., Chernyshova E.V., Serykh V.D. Calculation of load-bearing structures of hazardous industrial facility in case of internal explosion. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 3. Pp. 60–69. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-3-60-69