

DOI: <https://doi.org/10.18454/mca.2021.24.5>

## ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ ЗДАНИЙ ПРИ ВНЕШНЕМ АВАРИЙНОМ ВЗРЫВЕ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Научная статья

Бороденко А.Н.<sup>1\*</sup>, Липленко М.А.<sup>2</sup>, Мосолов Г.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-2549-9066;

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-7640-6072;

<sup>3</sup> ORCID: 0000-0001-7949-1022;

<sup>1, 2, 3</sup> ООО «НИИ Транснефть», Москва, Россия

\* Корреспондирующий автор (BorodenkoAN[at]niitnn.transneft.ru)

### Аннотация

В статье рассматриваются различные подходы к расчету нагрузок на здания от внешних взрывов и расчету строительных конструкций методом конечных элементов. Проведено сравнение различных вариантов расчета нагрузок от внешних взрывов на примере расчета здания операторной. Рассматриваются инженерные методики расчета параметров взрывных нагрузок, применяемые в настоящее время в практике проектирования, в сравнении с методикой численного моделирования гидрогазодинамики (CFD). Приведены результаты сравнения динамического и статических расчетов напряженно-деформированного состояния несущих конструкций монолитного железобетонного здания.

**Ключевые слова:** конечно-элементный расчет; топливно-воздушная смесь; внешний взрыв; коэффициент динамичности; дефлаграционный взрыв.

## APPROACHES TO THE BUILDING CALCULATIONS IN CASE OF AN EXTERNAL EMERGENCY EXPLOSION OF A FUEL-AIR MIXTURE

Research article

Borodenko A.N.<sup>1\*</sup>, Liplenko M.A.<sup>2</sup>, Mosolov G.V.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-2549-9066;

<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-7640-6072;

<sup>3</sup> ORCID: 0000-0001-7949-1022;

<sup>1, 2, 3</sup> Scientific Research Institute Transneft LLC, Moscow, Russia

\* Corresponding author (BorodenkoAN[at]niitnn.transneft.ru)

### Abstract

The article discusses various approaches to the calculation of loads on buildings from external explosions and the calculation of building structures via the finite element method. The article carries out a comparison of various options for calculating loads from external explosions using the calculation of the operations control building. The authors also examine engineering methods for calculating the parameters of blast loads currently used in design practice in comparison with CFD. The article presents the results of comparing dynamic and static calculations of the stress-strain state of load-bearing structures of a monolithic reinforced concrete building.

**Keywords:** finite element calculation; fuel-air mixture; external explosion; dynamism coefficient; deflagration explosion.

### Введение

На территории объектов нефтегазовой отрасли в результате разгерметизации технологического оборудования или трубопроводов возможно образование больших объемов топливно-воздушных смесей (ТВС), воспламенение которых может привести к пожарам, взрывам и разрушениям зданий и сооружений. Поэтому на предприятиях со взрывоопасными технологиями в дополнение к мерам, направленным на исключение аварийных выбросов взрывоопасных веществ, необходимо рассматривать комплекс мер, направленных на снижение ущерба при возможном взрывном горении ТВС, т.е. обеспечивающих взрывоустойчивость зданий и сооружений предприятия.

На сегодняшний день для расчета основных параметров взрывных волн разработано достаточно большое количество нормативной документации как федерального значения, так и стандартов предприятий в которых представлены инженерные методики расчета [1], [2].

Существующие методики, применяемые для оценки воздействия ударной волны (УВ) на объекты, в основном разработаны на основе результатов натурных экспериментальных исследований. Эти методики описывают, как правило, взрывы сферических облаков в открытом пространстве.

При помощи данных методик есть возможность рассчитать поля давлений и импульсов при взрывах, определить радиусы зон и уровни возможных разрушений. Однако они позволяют приблизительно определить возникающие разрушения и не учитывают реальную застройку, рельеф местности, реальную форму облака и переменную концентрацию в нем, местоположение источника воспламенения.

На сегодняшний день наиболее адекватно оценить параметры взрывной нагрузки позволяют средства численного моделирования с использованием математических моделей, описывающих процессы горения и распространения взрывных волн в 3-х мерном пространстве. Методы наиболее точно оценивающие последствия аварийного взрыва

используют подход вычислительной гидрогазодинамики (CFD – computational fluid dynamics) для расчета нагрузки от взрыва в определенных точках конструкции [3], [4], [5], [6] и др. Определение нагрузок на строительные конструкции зданий и сооружений при внешних взрывах ТВС может быть выполнено с использованием следующих различных CFD программных продуктов: ANSYS CFD (Fluent и CFX), LS-DYNA, Autoreagas, Flacs и т.д. С помощью данной методики выполняется расчет нагрузок от взрыва на здания и сооружения, а также отдельные элементы конструкций. Методика CFD позволяет учесть застройку окружающей территории на месте расположения проектируемого здания, количество и состав ТВС, а также различные преграды между источником взрыва и конструкцией здания. Возможность применения методики численного моделирования при определении нагрузок на здания с учетом геометрии окружающего пространства (застройки) рассматривалась в работах [14], [15], [16], в которых приводятся результаты сравнения экспериментальных данных с результатами численных расчетов.

Для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) несущих конструкций здания при внешнем взрыве целесообразно применение программных комплексов (ПК), реализующих метод конечных элементов. Не мало важным фактором при выборе ПК для прочностного анализа является возможность динамического расчета. Поскольку нагрузка от взрывов ТВС относится к быстротекающим процессам и имеет явно выраженный динамический характер.

### I. Методика расчета НДС несущих конструкций здания

В качестве исследуемого объекта для определения НДС несущих конструкций при внешнем взрыве ТВС рассмотрено отдельно стоящее здание операторной, расположенное на опасном производственном объекте. Рассматривалась аварийная ситуация, по сценарию которой возле здания операторной моделируется внешний взрыв ТВС. Пространство между зданием операторной и облаком ТВС принималось не загроможденным сторонними препятствиями. Параметры взрывной волны (давление и импульс во фронте) рассчитывались по двум методикам:

- инженерная методика, представленная в Приказе Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 31 марта 2016 г №137 [2];
- методика CFD.

По результатам расчетов получены следующие параметры падающей взрывной волны у фронтальной стены исследуемого здания: максимальное избыточное давление во фронте волны  $P_{com} = 8,2$  кПа и импульс фазы сжатия  $I_{com} = 0,431$  кПа·с.

Величины нагрузок от внешнего взрыва на различные поверхности здания вычислялись по трем методикам:

- инженерная методика, разработанная АО «ЦНИИПромзданий» [7];
- инженерная методика, предложенная в нормативном документе [8], который регламентирует определение особых нагрузок и воздействий на здания и сооружения. Данная методика в [8] представлена в упрощенном виде, с более полным вариантом можно ознакомиться в нормах США [9].
- методика CFD.

Следует отметить, что в рамках численного моделирования (CFD) выполняются расчеты взрывного горения и взаимодействия взрывной волны с исследуемым объектом.

Результаты расчетов полей давления при внешнем взрыве ТВС методом вычислительной гидрогазодинамики (CFD), а также графики изменения давления во времени на различных поверхностях исследуемого здания, показаны на рисунке 1 и рисунке 2 соответственно.

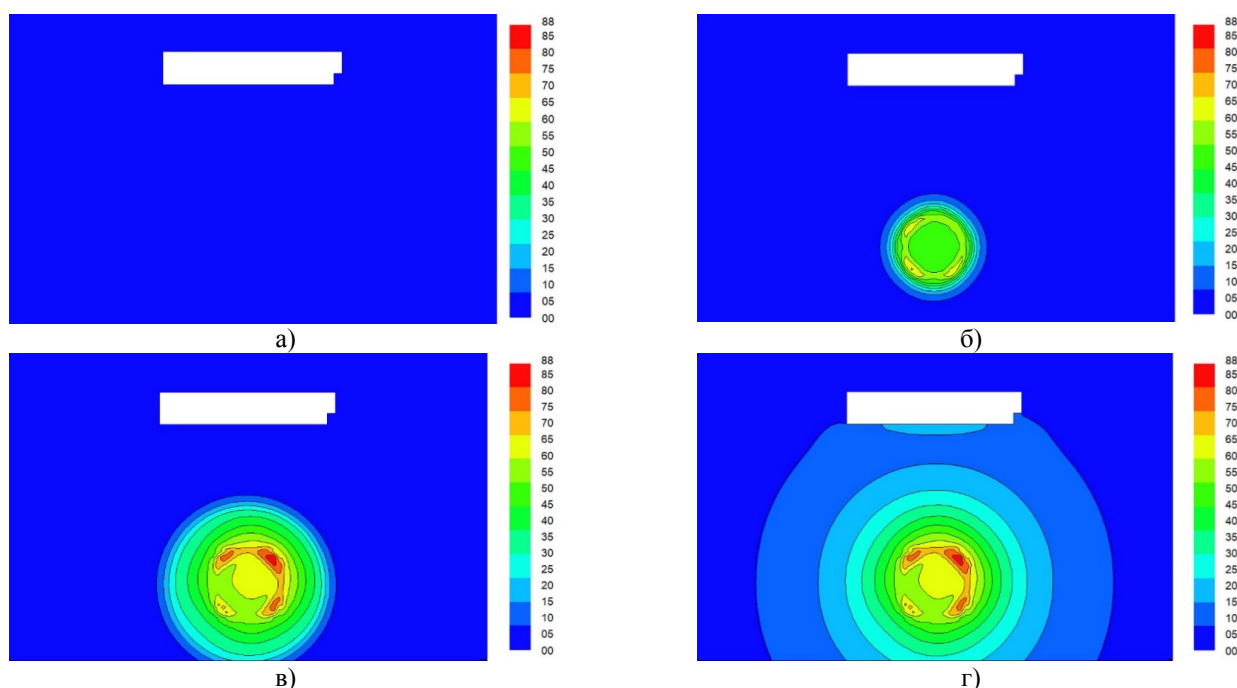


Рис. 1 – Поля давления [кПа] при внешнем взрыве ТВС возле здания операторной в различные моменты времени [сек]:

а) 0,0; б) 0,223; в) 0,260; г) 1,5

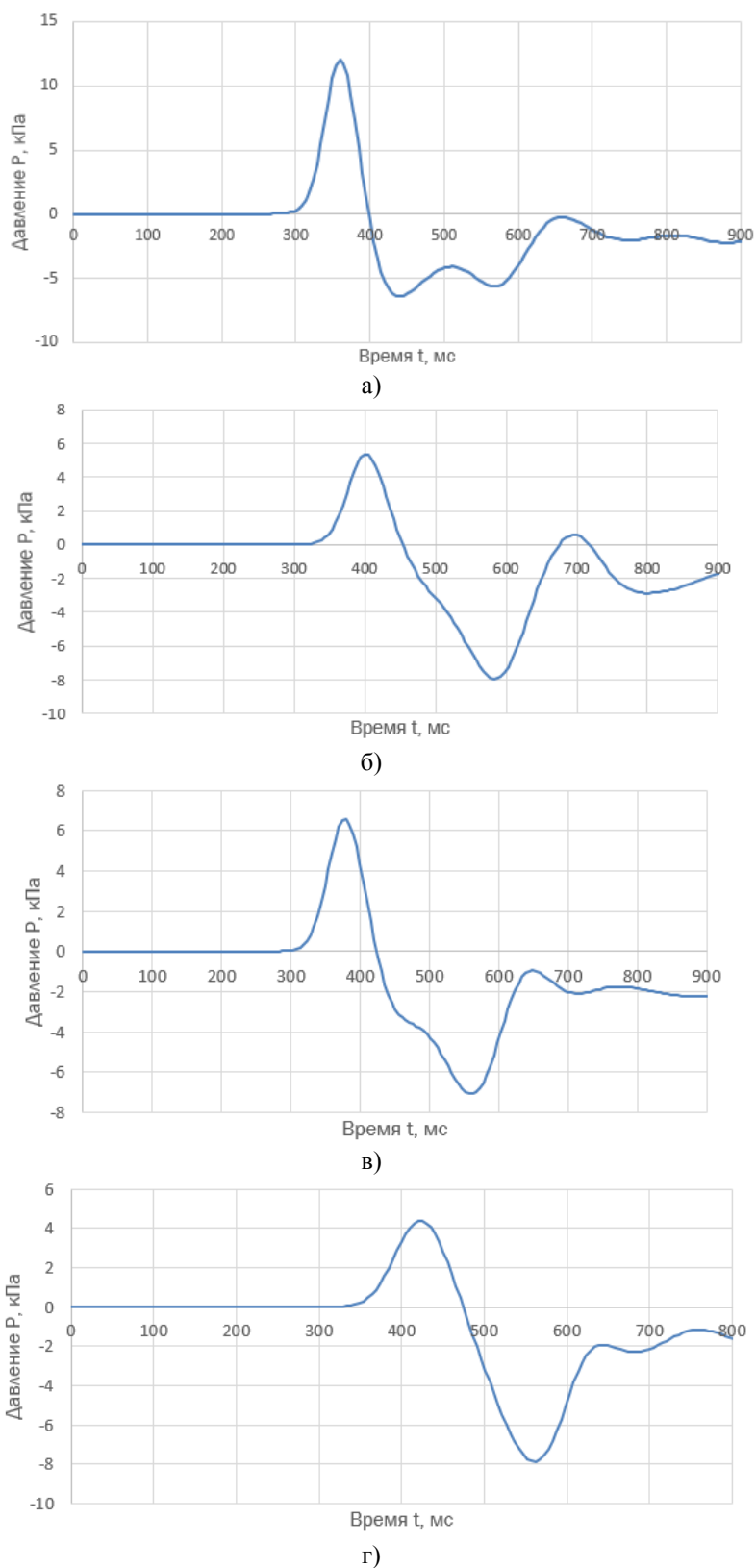


Рис. 2 – Графики изменения давления во времени на различных поверхностях здания:  
 а) на фронтальной стене; б) на боковых стенах; в) на кровле; г) на тыльной стене

Результаты расчета нагрузок на различные поверхности здания при внешнем взрыве ТВС по трем методикам представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Максимальное избыточное давление на здание  $P_{com,max}$ 

№ п/п	Поверхность здания	Методика 1 [7]	Методика 2 [8]	Методика 3 (CFD)
1	2	3	4	5
1	Фронтальная стена, кПа	19,68	16,96	12,05
2	Кровля, кПа	9,84	6,57	5,89
3	Боковые стены, кПа	9,84	6,57	4,84
4	Тыльная стена, кПа	4,92	6,57	3,94

По результатам проведенных расчетов параметров взрыва для сравнения различных методик расчета определялся коэффициент  $k_0$  (таблица 2), равный отношению максимального избыточного давления на поверхности здания  $P_{com,max}$  (таблица 1) к максимальному избыточному давлению во фронте падающей волны  $P_{com}$ .

Таблица 2 – Результаты расчета коэффициента  $k_0$ 

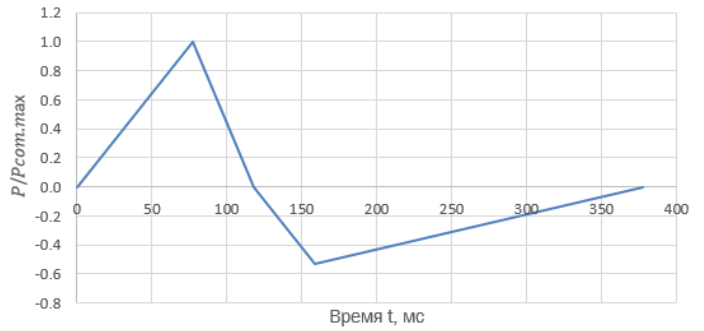
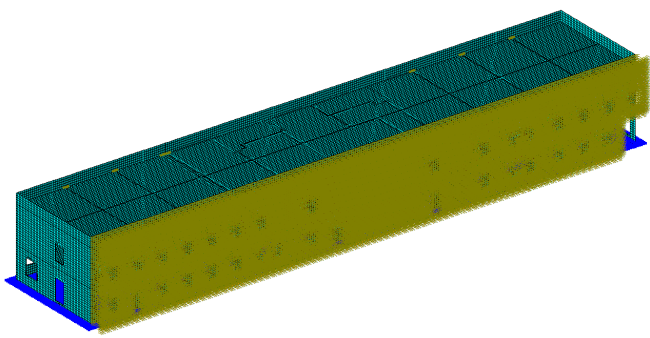
№ п/п	Поверхность здания	Методика 1 [7]	Методика 2 [8]	Методика 3 [CFD]
1	2	3	4	5
1	Фронтальная стена $k_{0,f}$	2,4	2,069	1,47
2	Кровля $k_{0,k}$	1,2	0,802	0,72
3	Боковые стены $k_{0,b}$	1,2	0,802	0,59
4	Тыльная стена $k_{0,t}$	0,6	0,802	0,48

Из таблиц 1 и 2 видно, что отличия в значениях нагрузки на поверхности здания, вычисленных инженерными методиками 1, 2 и численной методикой 3 (CFD), отличаются до двух раз (для боковых стен). Это обусловлено, что инженерные методики используют консервативный подход при оценке взаимодействия взрывной волны с препятствием (зданием), то есть такой подход справедлив при детонационном характере взрыва (ударной волне). При дефлаграционном взрыве ТВС (волне сжатия) наблюдается другая картина. Поскольку давление на фронте волны в начальный момент времени взаимодействия волны с преградой практически отсутствует и нарастает постепенно, то за время установления процесса обтекания оно не успевает достичь больших значений [10].

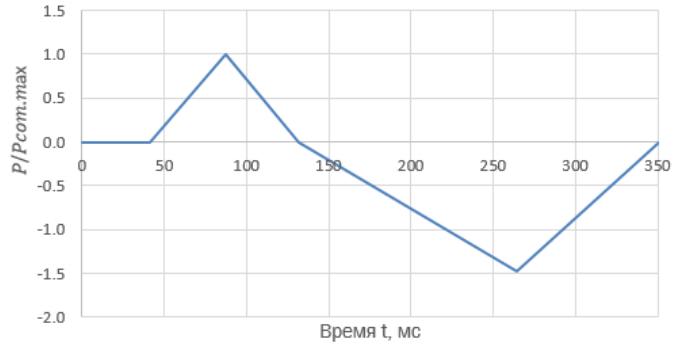
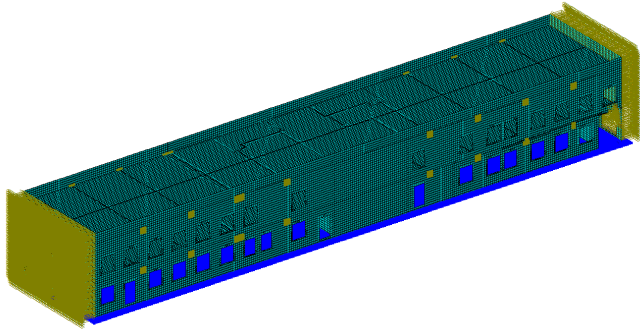
Расчет НДС конструкций здания выполнялся в ПК ЛИРА-САПР [11], [12], [13] в статической (для нагрузок, определенных по инженерным методикам 1 и 2 см. таблицу 1) и динамической (для нагрузки, определенной по методике CFD) постановках задачи.

Взрывное воздействие на различные поверхности здания задавалось при помощи законов изменения нагрузки во времени в виде кусочно-линейной функции. Схемы приложения нагрузок с графиками изменения давления во времени на конструкции здания в относительных величинах показаны на рисунке 3.

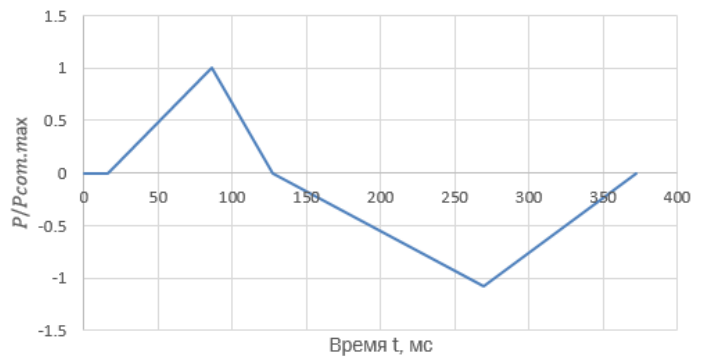
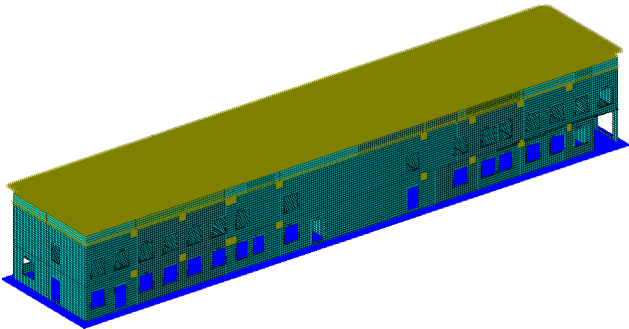
В расчетной модели нагрузки принимались равномерно распределенными и нормально приложенными к поверхностям конструкций здания: фронтальной, боковым и тыльной стенам, кровле.



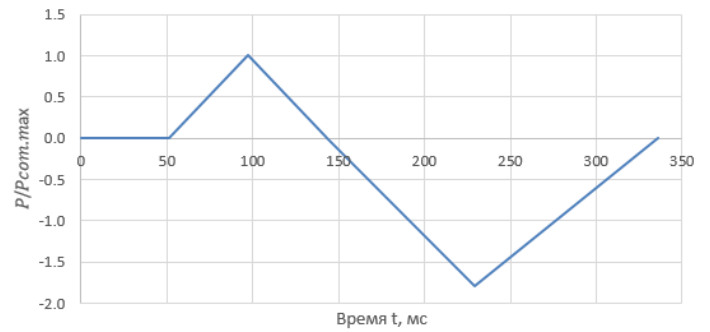
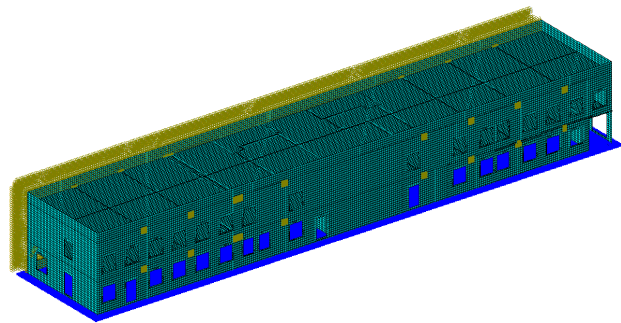
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3 – Схемы приложения нагрузок на различные поверхности здания в ПК ЛИРА-САПР при динамическом расчете:

а) на фронтальной стене; б) на боковых стенах; в) на кровле; г) на тыльной стене

## II. Результаты расчета НДС несущих конструкций здания

В ходе выполнения расчетов НДС здания операторной на нагрузки от взрыва ТВС, рассчитанные по трем различным методикам, определены внутренние силовые факторы: продольные и поперечные силы, изгибающие моменты. На рисунке 4 приведены изополю изгибающих моментов во фронтальной стене, как наиболее нагруженном элементе. Для удобства сравнения в таблице 3 приведены максимальные и минимальные значения изгибающих моментов во фронтальной стене здания.



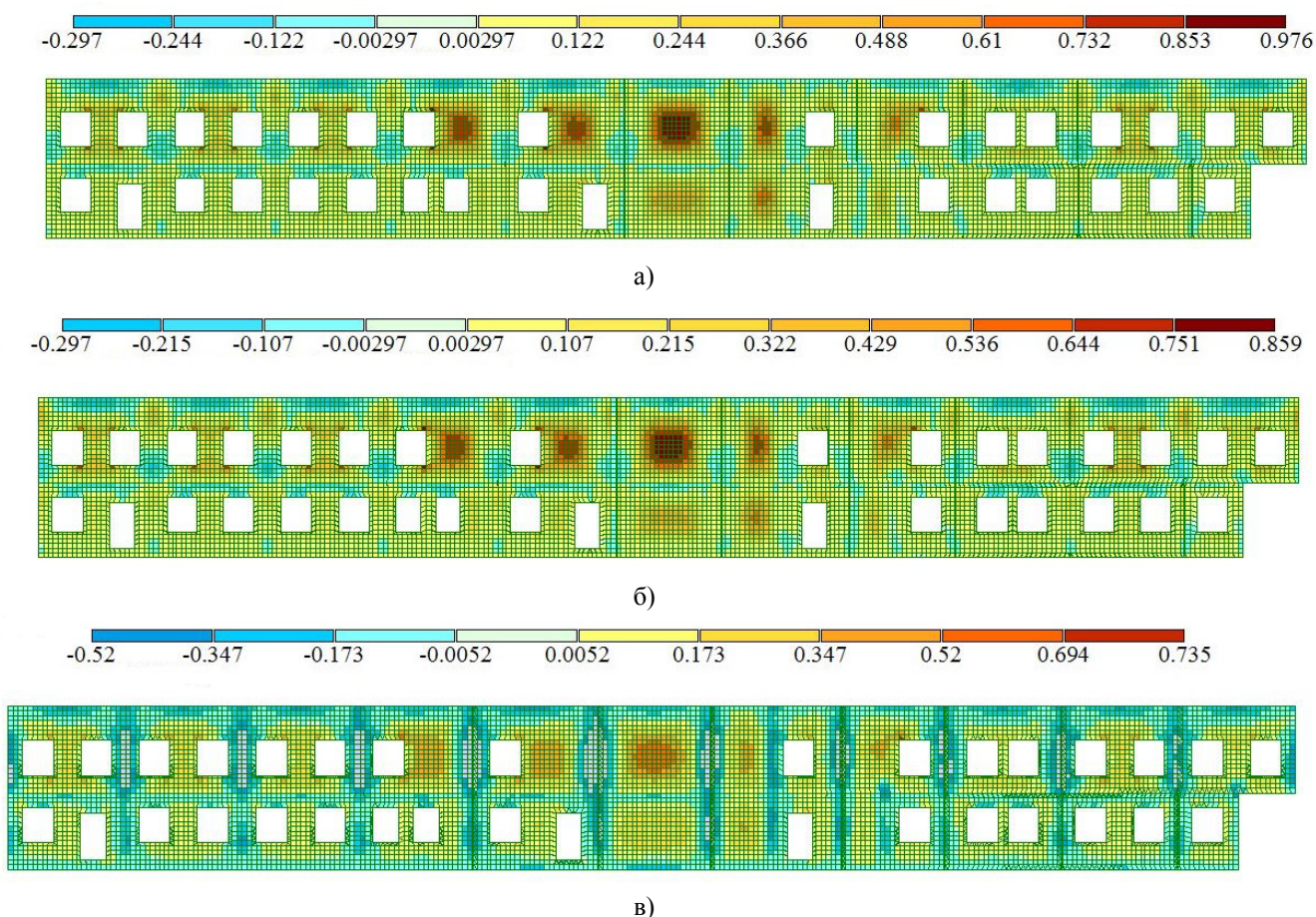


Рисунок 4 – Изополя изгибающих моментов во фронтальной стене в ПК ЛИРА-САПР при статическом и динамическом расчетах (т\*м)/м:  
 а) по методике 1; б) по методике 2; в) по методике 3 (CFD)

Сравнение результатов расчета показывает (см. таблицу 3), что применение методики численного моделирования (CFD) при определении нагрузок на поверхности здания или сооружения при внешнем взрыве ТВС совместно с динамическим расчетом НДС позволяет снизить усилия в элементах конструкций. В виду более точного определения взаимодействия между взрывной волной и зданием или сооружением.

Таблица 3 – Результаты определения изгибающих моментов во фронтальной стене здания операторной

№ п/п	Внутренний силовой фактор	Изгибающие моменты во фронтальной стене		
		Методика 1 [7]	Методика 2 [8]	Методика 3 (CFD)
1	2	3	4	5
1	Максимальный момент $M_x$ , (т*м)/м	<b>0,976</b>	<b>0,859</b>	<b>0,735</b>
2	Минимальный момент $M_x$ , (т*м)/м	-0,297	-0,297	-0,52
3	Максимальный момент $M_y$ , (т*м)/м	<b>1,51</b>	<b>1,34</b>	<b>0,967</b>
4	Минимальный момент $M_y$ , (т*м)/м	-1,25	-1,25	-1,28

### Выводы

1. Выполненные расчеты нагрузок при внешнем взрыве ТВС на здание операторной по различным методикам и их сравнения показывают, что максимальные значения реализуются по инженерным методикам [7], [8]. Тогда как нагрузки, рассчитанные в ходе численного моделирования – CFD метода ниже на от 39 до 51 %.

2. Инженерные методики расчета параметров взрывных волн [7], [8] и нагрузок на здания при взрывах ТВС являются консервативными и не в полной мере учитывают характер взрывного превращения (детонация или дефлаграция). Такой подход при достаточно больших объемах облака ТВС приводит к существенным запасам, а иногда некорректным проектным решениям.

3. Сравнение изгибающих моментов в наиболее нагруженном конструктивном элементе (фронтальная стена) показывает, что значения моментов при динамическом расчете, выполненному на нагрузки, определёнными при помощи CFD метода, меньше на от 24 до 36% по отношению к статическому расчету, выполненному на нагрузки, определёнными по инженерным методикам.

4. Решение задачи определения НДС несущих конструкций здания динамическим методом при взрывных воздействиях позволяет отказаться от коэффициентов динамичности, которые для зданий сложной конфигурации бывает сложно, а порой и вовсе невозможно определить.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Список литературы / References

1. СТО Газпром 2-2.3-351-2009 «Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром». М.: 2009. – 387 с.
2. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 31 марта 2016 г. № 137 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей».
3. Jingde Li. Internal and external pressure prediction of vented gas explosion in large rooms by using analytical and CFD methods / Jingde Li, Hong Hao // Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017. – 42 с.
4. Larcher M. Explosions in complex geometries - a comparison of several approaches / M. Larcher, F. Casadei // International Journal of Protective Structures, vol. 1, no. 2, pp. 169–195, 2010.
5. Невская Е.Е. Повышение устойчивости зданий и сооружений при взрывах топливно-воздушных смесей на объектах нефтегазовой отрасли: дис. ... канд. тех. наук: 05.26.03 / Невская Елена Евгеньевна. – Москва, 2018. – 122 с.
6. Makarov, D. Modelling and simulation of lean hydrogen-air deflagrations in 120 m3 enclosure / Makarov, D., Molkov, V. // Hydrogen Safety Engineering and Research Centre (HySAFER).
7. Пособие по обследованию и проектированию зданий и сооружений, подверженных воздействию взрывных нагрузок. – М: АО «ЦНИИПромзданий», 2000. – 122 с.
8. СП 296.1325800.2017 Здания и сооружения. Особые воздействия. М.: Стандартиформ. – 2017. – 65 с.
9. UFC 3-340-02 Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Department of Defense, Washington, DC, 2008.
10. Аварийные взрывы газоздушных смесей в атмосфере / Д.З. Хуснутдинов, А.В. Мишуев, В.В. Казеннов, А.А. Комаров, Н.В. Громов; М-во образования и науки Росс. Федерации. Моск. гос. строит. ун-т. Москва: МГСУ. 2014. 80 с.
11. Программный комплекс ЛИРА-САПР. Руководство пользователя. Обучающие примеры Ромашкина М.А., Титок В.П. Под редакцией академика РААСН Городецкого А.С. Электронное издание, 2018г. – 254 с.
12. ЛИРА-САПР. Книга I. Основы. Е.Б. Стрелец-Стрелецкий, А.В. Журавлев, Р.Ю. Водопьянов. Под ред. Академика РААСН, докт. техн. наук, проф. А.С. Городецкого. – Издательство LIRALAND, 2019. – 154с.
13. Барабаш М.С. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния кирпичного жилого здания при взрыве бытового газа внутри помещения / Барабаш М.С., Кирыязев П.Н., Ромашкина М.А. // Международный журнал по расчету гражданских и промышленных конструкций – 2016. - №12. – С. 73-85.
14. Remennikov, A. The state of the art of explosive loads characterisation. In N. Lam, J. Wilson, G. Gibson & S. Anderson (Eds.), Australian Earthquake Engineering Society Conference (pp. 1-25). Wollongong, NSW: Australian Earthquake Engineering Society, 2007.
15. Remennikov A. M. Modelling blast loads on buildings in complex city geometries / Remennikov A. M., Rose T. A. // Computers and Structures 83. 2005. pp. 2197-2205.
16. Van Den Berg A.C. AutoReaGas – A CFD – Tool for gas explosion hazard analysis / Van Den Berg A.C., Mercx W.P.M., Mouilleau Y., Hayhurst C.J. // TNO Prins Maurits Laboratory. 1994. 15 p.

#### Список литературы на английском языке / References in English

1. STO Gazprom 2-2.3-351-2009 «Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu analiza riska dlya opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov gazotransportnykh predpriyatij ОАО «Gazprom» [STO Gazprom 2-2.3-351-2009 "Guidelines for Risk Analysis for Hazardous Production Facilities of Gas Transportation Enterprises of JSC Gazprom]. М.:2009.-387 p. [in Russian]
2. Prikaz Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 31 marta 2016 g. № 137 «Ob utverzhdenii Rukovodstva po bezopasnosti «Metodika ocenki posledstvij avarijnykh vzryvov toplivno-vozdushnykh smesej» [Order of the Federal Environmental Service. technological and nuclear supervision of March 31, 2016 No. 137 "On approval of the Safety Guide" Methodology for assessing the consequences of emergency explosions of fuel-air mixtures"]. [in Russian]
3. Jingde Li. Internal and external pressure prediction of vented gas explosion in large rooms by using analytical and CFD methods / Jingde Li, Hong Hao // Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017. - 42 p.
4. Larcher M. Explosions in complex geometries - a comparison of several approaches / M. Larcher, F. Casadei // International Journal of Protective Structures, vol. 1, no. 2, pp. 169-195, 2010.
5. Nevskaya E.E. Povyshenie ustojchivosti zdaniy i sooruzhenij pri vzryvah toplivno-vozdushnykh smesej na ob"ektah neftegazovoj otrasli [Increasing the stability of buildings and structures during explosions of fuel-air mixtures at oil and gas facilities]: dis. ... Cand. those. Sciences: 05.26.03 / Nevskaya Elena Evgenevna. - Moscow, 2018. -- 122 p. [in Russian]
6. Makarov, D. Modelling and simulation of lean hydrogen-air deflagrations in 120 m3 enclosure / Makarov, D., Molkov, V. // Hydrogen Safety Engineering and Research Centre (HySAFER).
7. Posobie po obsledovaniyu i proektirovaniyu zdaniy i sooruzhenij, podverzhennykh vozdejstviyu vzryvnykh nagruzok [A guide for the survey and design of buildings and structures exposed to explosive loads]. - M: АО TsNIIPromzdaniy, 2000. - 122 p. [in Russian]
8. SP 296.1325800.2017 Zdaniya i sooruzheniya. Osobyje vozdejstviya [SP 296.1325800.2017 Buildings and structures. Special effects]. М.: Standartinform. - 2017. -- 65 p. [in Russian]
9. UFC 3-340-02 Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Department of Defense, Washington, DC, 2008.

10. Avarijnye vzryvy gazovozdushnyh smesej v atmosfere [Emergency explosions of gas-air mixtures in the atmosphere] / D.Z. Khusnutdinov, A.V. Mishuev, V.V. Kazennov, A.A. Komarov, N.V. Gromov; Ministry of Education and Science Ross. Federation. Moscow state builds. un-t. Moscow: MGSU. 2014.80 p. [in Russian]
  11. Programmnyj kompleks LIRA-SAPR. Rukovodstvo pol'zovatelya [LIRA-SAPR software package. User guide]. Educational examples Romashkina M.A., Titok V.P. Edited by Academician of RAASN A.S. Gorodetsky Electronic edition, 2018 - 254 p. [in Russian]
  12. LIRA–SAPR. Kniga I. Osnovy [LIRA-SAPR. Book I. Basics]. E.B. Strelets – Streletsky, A.V. Zhuravlev, R. Yu. Vodopyanov. Ed. Academician of RAASN, Dr. tech. Sciences, prof. A.S. Gorodetsky. - Publishing house LIRALAND, 2019 .—154 p. [in Russian]
  13. Barabash M.S. CHislennoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kirpichnogo zhilogo zdaniya pri vzryve bytovogo gaza vnutri pomeshcheniya [Numerical modeling of the stress-strain state of a brick residential building during an explosion of domestic gas inside the building] / Barabash M.S., Kiryazev P.N., Romashkina M.A. // International Journal for the Calculation of Civil and Industrial Structures - 2016. - No. 12. - P. 73-85. [in Russian]
  14. Remennikov, A. The state of the art of explosive loads characterisation. In N. Lam, J. Wilson, G. Gibson & S. Anderson (Eds.), Australian Earthquake Engineering Society Conference (pp. 1-25). Wollongong, NSW: Australian Earthquake Engineering Society, 2007.
  15. Remennikov A. M. Modelling blast loads on buildings in complex city geometries / Remennikov A. M., Rose T. A. // Computers and Structures 83. 2005. pp. 2197-2205.
  16. Van Den Berg A.C. AutoReaGas – A CFD – Tool for gas explosion hazard analysis / Van Den Berg A.C., Merx W.P.M., Mouilleau Y., Hayhurst C.J. // TNO Prins Maurits Laboratory. 1994. 15 p.
- 
-