

5. Постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней»
6. Постановление Правительства РФ от 17 марта 2015 г. № 235 «О порядке присуждения ученых степеней лицам, использующим в своих работах сведения, составляющие государственную тайну»
7. Ожегов С.И. Толковый словарь русского языка // URL: <http://www.ozhegov.org> (дата обращения 07.09.2021)
8. Постановление Правительства РФ от 10 декабря 2013г. № 1139 «О порядке присвоения ученых званий»

Сведения об авторах

Григорьев Владимир Николаевич, доцент, ведущий научный сотрудник 2 НИЦ ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), тел. 8 (965) 380-71-21, E-mail: prorab69@rambler.ru

Дуганов Василий Александрович, начальник 2 НИЦ ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), тел. 8(903) 250 25 93, E-mail: dugvas@mail.ru

УДК 622.235.3

DOI: 10.36535/0869-4179-2021-05-5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ПРИ ГАЗОВЫХ ВЗРЫВАХ В ЗАМКНУТЫХ ВЕНТИЛИРУЕМЫХ ОБЪЁМАХ

Кандидат техн. наук *Д.А. Корольченко, А.А. Евич*
Институт комплексной безопасности в строительстве НИУ МГСУ

В отсутствие надёжных расчётных методов экспериментальная обработка элементов оборудования и конструкций на тепловые нагрузки при газовом дефлаграционном взрыве может стать основным способом избежать ошибок при проектировании и строительстве различных помещений, отсеков и модулей. В ИКБС НИУ МГСУ разработан способ оценки тепловых нагрузок при лабораторном воспроизведении внутренней газовой дефлаграции, базирующийся на непосредственном измерении тепловых импульсов, минуя определение полей температур и скоростей газа.

Ключевые слова: взрывокамера, вентилируемый объём, внутренний дефлаграционный взрыв, тепловой импульс.

EXPERIMENTAL ESTIMATION OF HEAT LOAD SPATIAL DISTRIBUTION DURING VENTED GAS EXPLOSIONS IN CONFINED SPACES

Ph.D.(Tech.) *D.A. Korlchenko, A.A. Evich*
Moscow State University of Civil Engineering

In the absence of reliable calculation methods experimental testing of equipment elements and structures for thermal loads during a gas deflagration explosion can become the main way to avoid errors in the design and construction of various rooms, compartments and modules. A method for estimating thermal loads during laboratory reproduction of internal gas deflagration, based on direct measurement of thermal pulses, bypassing the determination of the temperature fields and gas velocities, has been developed at the Institute of Integrated Safety in Construction of National Research Moscow State University of Civil Engineering.

Keywords: explosion test chamber, vented space, internal deflagration, thermal pulse.

Пожар как следствие внутреннего газового взрыва возникает примерно в половине случаев соответствующих аварий в жилом и промышленном секторе. А в специальных условиях – на судне, подводном или надводном корабле, в надтопливном пространстве топливного бака, морской платформе или комплексе сжиженного природного газа – сопровождение взрыва пожаром создаёт критическую угрозу всему объекту в целом [1,2]. Экспериментальная отработка силовых и функциональных элементов конструкций помещений различного назначения, в том числе составляющих специальных промышленных объектов, отсеков и закрытых модулей, а также элементов оборудования и приборов на воздействие внутренних дефлаграционных взрывов является в настоящее время в значительной степени недооценённой. Между тем, расчётные методы определения параметров как слабой, так и сильной внутренней дефлаграции, по-видимому, бесперспективны, кроме грубо-прикидочных. Это отмечал ещё один из основателей советской ядерной индустрии К.И. Щёлкин. В совокупности с простотой и дешёвизной соответствующих лабораторных испытаний сложившееся положение составляет один из парадоксов нашего времени.

В действительности, имеющаяся в стране экспериментальная база позволяет проводить как модельные, так и в ряде случаев полномасштабные испытания объектов не только на силовое, но и на температурное нагружение при внутренних дефлаграционных взрывах, в том числе со сбросом предохранительных и защитных ограждающих конструкций. В частности, в Институте комплексной безопасности в строительстве НИУ МГСУ разработана методика определения тепловых нагрузок при экспериментальном моделировании газовой дефлаграции в замкнутом вентилируемом объёме, базирующаяся на непосредственном измерении тепловых импульсов. Использовались изобретённые авторами методики индикаторы тепловых импульсов, представляющие собой тонкостенные чувствительные элементы в металлической огранке (рис. 1). Для чувствительного элемента подбирался материал с относительно высокими температурой воспламенения и теплопроводностью, но достаточно низкими теплоёмкостью и потребностью в кислороде при горении. Отметим, что тонкостенность элемента позволяет проводить количественные оценки времени его воспламенения в сравнительных условиях аналитическими методами [3], что оказывается полезным при калибровке индикаторов. Подбор материала чувствительного элемента в различных опытах позволил остановиться на целлюлозе (бумаге).

Конечной целью экспериментов по отработке методики определения тепловых нагрузок при внутреннем газовом взрыве являлось создание дешёвого, но достаточно точного для практических целей способа лабораторных измерений параметров суммарного теп-

лового воздействия на элементы оборудования и ограждающие конструкции в различных пространственных точках испытательной камеры. В перспективе этот способ должен быть применим и при натурных испытаниях объёмных конструкций. Но на начальном этапе исследований определялась принципиальная возможность оценивать вероятность как локальных возгораний после взрыва в определённых точках камеры, так и сплошного пожара для различных поверхностей в разных ситуациях.

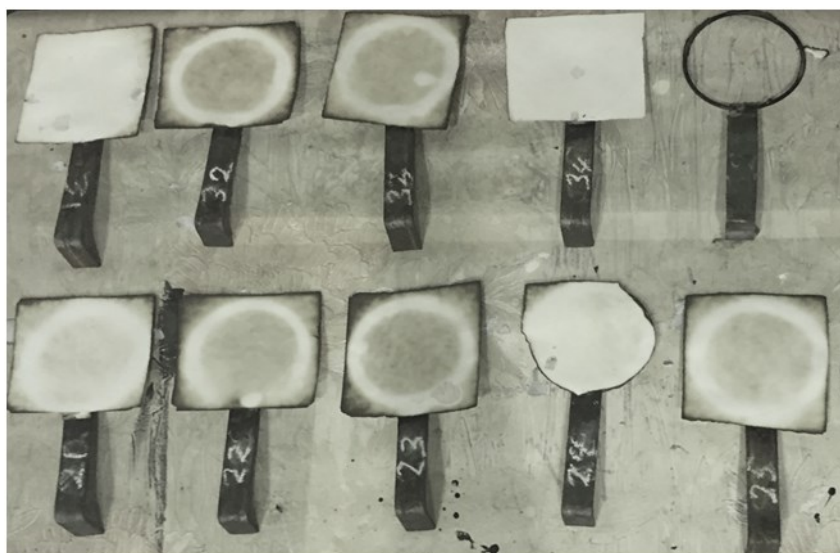


Рис. 1. Внешний вид индикаторов после проведения эксперимента

Влияние на результаты опытов положения точки поджигания газовой смеси и прочих начальных стендовых параметров на данном этапе не исследовалось, чтобы не превращать раньше времени задачу в многопараметрическую. В то же время известно [4], что местоположение и мощность поджига существенны, как и наличие оборудования в моделируемом помещении, способного исказить фронт пламени и приводить к турбулизации процесса [5], расположение сбросного проёма [6] или неравномерность предварительного перемешивания газовой смеси [7].

Для отработки методики измерений интегральных тепловых импульсов при дефлаграции, т.е. количеств теплоты в различных пространственных точках, полученных единичными площадками за всё время взрыва, включая этап имплозии, использовалась кубическая взрывокамера объёмом 10 м^3 с прямоугольным сбросным (вентилирующим) проёмом в центре боковой грани. Была проведена серия взрывов смеси пропана с воздухом с записью изменения давления и с использованием скоростной видеосъёмки. Видеофиксация применялась для определения момента вскрытия сбросного проёма и для наблюдения за состоянием части индикаторов тепловых импульсов. Величина тепловых импульсов определялась по потерям светлоты чувствительных элементов индикаторов, которая вычислялась путём сканирования и обработки изображения программой Adobe Photoshop. Индикаторы располагались таким образом, чтобы охватить практически всё пространство камеры: в пяти сечениях, перпендикулярных горизонтальной оси камеры, направленной в сторону сбросного проёма, по 6-9 индикаторов в каждом сечении [8].

В работе коллектива Пекинских авторов [9] показано, что временные хроники давления в вентилируемых объёмах при газовой дефлаграции имеют многопиковый характер. В общем случае насчитывают до восьми пиков различной физической природы, включая

такие относительно редкие явления как колебания Гельмгольца. Анализ некоторых причин, приводящих к появлению экстремумов в зависимости от времени давления дефлаграционного взрыва дан также в статье [10] о вибрационном горении.

В данном случае параметры взрыва и сбросного устройства подбирались таким образом, чтобы после точки перегиба на графике давления (начало вентилирования) реализовывался один чёткий максимум давления (доминантный пик) перед полным открытием сбросного отверстия (рис. 2-6). Последующие пики соответствуют моменту достижения пламенем стенок камеры (наибольшая поверхность горения), догоранию газовой смеси в камере, имплозии и акустическим колебаниям. Отметим, что в задаче о силовом разрушении помещения важен наибольший по величине пик давления, в то время как при оценке вибровоздействия на приборы и оборудование, как и в задаче о вероятности сопровождения взрыва пожаром имеют значения все участки индикаторной диаграммы.

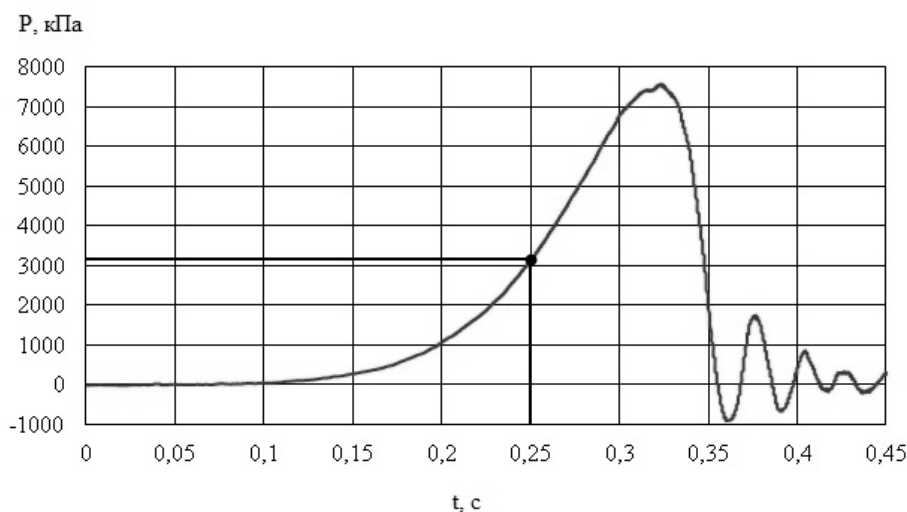


Рис. 2. Зависимость давления взрыва от времени



Рис. 3. Момент поджига смеси (1 мс)



Рис. 4. Момент начала вскрытия проёма (250 мс)



Рис. 5. Освобождение проёма (342 мс)



Рис. 6. Догорание смеси внутри камеры (417 мс)

Предварительная калибровка индикаторов на стандартной установке по ГОСТ 30402-96 без системы принудительного зажигания позволила связать степень светлоты (черноты) чувствительных элементов с полученным количеством теплоты Q на единицу площади поверхности. Для примера на рис. 7 показаны образцы чувствительных элементов индикаторов, получивших различную «дозу» тепла. Данная калибровка позволяет непосредственно без пересчёта определить количество теплоты, полученное образцом за всё время взрыва, т.е. тепловые импульсы в различных точках взрывной камеры.

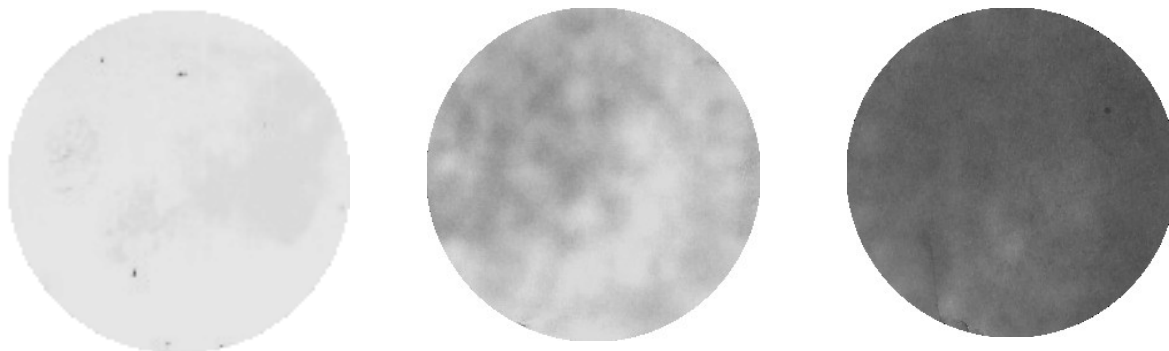


Рис. 7. Вид индикаторов для Q , равных 100, 300 и 450 кДж/м²

Строго говоря, эквивалентность медленного беспламенного нагрева чувствительного элемента индикатора лучистой энергией на стандартной установке и импульсного нагрева при взрыве подлежит доказыванию, однако интуитивно понятно, что повреждающее воздействие на поверхность элемента в обоих случаях одно и то же. Расчёты по формулам, приведённым в монографии [11], показывают также, что для реализованных в экспериментах параметрах взрыва пробежка пламени по поверхности элемента не возникает, по крайней мере, до имплозии.

Состояние индикаторов в каждом испытании позволило выявить общую картину распределения тепловых нагрузок при взрыве для данных конкретных условий эксперимента (дефлаграция смеси пропана с воздухом в вентилируемом помещении, по размерам приближённом к типичному при авариях, без внутреннего оборудования). Это, в свою очередь, позволяет в дальнейшем перейти к экспериментальному решению задачи о вероятности поствзрывного пожара. В данном же простом случае обобщённо можно заключить, что характер распределения теплового импульса при взрыве не отличался от логически предсказуемого. Наиболее нагруженными в смысле теплового воздействия, т.е. пожароопасными, оказались зоны от центра вверх и от центра к сбросному проёму. Количественно величины теплового импульса достигали в этих зонах 600 кДж/м² (полностью чёрный индикатор) и выше (сгорание чувствительного элемента индикатора). Причём видеосъёмка позволила определить, что бумага индикатора воспламеняется после активной фазы взрыва, спада давления и поступления в камеру через открытый проём свежего воздуха. Непосредственно же при взрыве осуществляется только пиролиз горючих материалов. К наименее нагруженным можно отнести пространства у боковых стенок и в углах камеры. Тепловой импульс в этих местах не превышал 350 кДж/м².

Даже такие не требующие больших материальных ресурсов испытания позволяют заключить, что в случае высокой опасности взрывов с последующим пожаром, например в отсеках кораблей и судов, закрытых модулях морских платформ, помещениях специаль-

ных производственных объектов и т.д., противопожарные разрывы, негорючие вставки, панели, барьеры и другие пассивные противопожарные средства следует устанавливать в верхней части помещений (на потолках) в направлении от возможного источника воспламенения к открытым или вскрываемым защитным проёмам. В угловых пространствах, возможно, следует устанавливать либо активные автоматические средства пожаротушения и флегматизации с направлением их рабочих потоков в указанные выше нагруженные зоны, либо наиболее уязвимые в пожарном отношении элементы оборудования. Момент срабатывания средств пожаротушения можно приурочивать к достижению максимального расчётного давления взрыва и даже с задержкой на половину расчётной длительности активной фазы взрыва. Необходимость безынерционной регистрации взрыва (по световому излучению) в данном случае отсутствует.

Интересно отметить, что вопросы оптимального пространственного размещения оборудования и автоматических средств борьбы с огнём на подобных объектах пока ещё не находят отражения ни в соответствующих нормативных документах, ни в отечественных научных публикациях по тематике взрывобезопасности [12-16].

Выводы

1. В разработанной методике экспериментальной оценки теплонагруженности элементов конструкций при внутреннем газовом взрыве, в качестве измерителей теплового импульса, т.е. суммарного количества теплоты, полученного различными поверхностями в результате взрыва, использовались индикаторы с чувствительным элементом из целлюлозы.

2. Реализован способ калибровки индикаторов тепловых импульсов стандартной установки по ГОСТ 30402-96, позволяющий проводить не только качественные, но и количественные оценки теплового воздействия на горючие материалы, оказавшиеся в зоне взрыва. В результате, появляется возможность определять вероятность возникновения поствзрывного пожара в тех или иных условиях.

3. Проведённые испытательные взрывы в камере объёмом 10 м³ со сбросным проёмом позволили наблюдать закономерности воздействия теплового импульса на горючие материалы и определять наиболее и наименее пожароопасные зоны в модельных случаях. Установлено, в частности, что для исходной газовой смеси стехиометрического состава добиться воспламенения материала в активной фазе взрыва практически невозможно; это всегда происходит при поступлении свежего воздуха через вскрытый проём при значениях тепловых импульсов 600 и более кДж/м². Для «бедных» смесей данный вывод может оказаться неверным вследствие большого содержания кислорода в продуктах сгорания.

Литература

1. Гордиенко Д.М. Проблемы обеспечения пожарной безопасности объектов нефтегазодобычи в арктическом бассейне. Интернет-журнал "Технологии техносферной безопасности" (<http://academygps.ru/ttb>). - 2017. Выпуск № 1 (71)

2. Лисанов М.В., Сумской С.И., Самусева Е.А. Применение методологии количественного анализа риска для оценки взрывоустойчивости морских нефтегазодобывающих платформ. Электронный сборник научных статей «Предотвращение аварий зданий и сооружений-2010», pamag.ru/src/prensa/026.pdf, дата обращения 22.02.2021.

3. Ulf Wickström. Temperature Calculation in Fire Safety Engineering. Springer International Publishing Switzerland 2016. ISBN 978-3-319-30170-9, ISBN 978-3-319-30172-3 (eBook). DOI 10.1007/978-3-319-30172-3

4. Luo, Xinjiao; Wang, Changjian; Rui, Shengchao; Wan, Yang; Zhang, Zhi; Li, Quan Effects of ignition location, obstacles, and vent location on the vented hydrogen-air deflagrations with low vent burst pressure in a 20-foot container // Fuel. Volume 280 (2020).

5. Wang, Lei et al. Experimental investigation of the propagation of deflagration flames in a horizontal underground channel containing obstacles // Tunnelling and underground space technology. Volume 78 (2018); pp 201-214.

6. Поландов В.Х., Добриков С.А., Корольченко А.Я. Взрыв газа в цилиндрической трубе с отверстием на боковой поверхности. // Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25, №11. — С. 17–26. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.17-26.

7. Skjold, T. et al. Vented hydrogen deflagrations in containers: Effect of congestion for homogeneous and inhomogeneous mixtures // International journal of hydrogen energy. Volume 44: Number 17 (2019, April 2nd); pp 8819-8832.

8. Поландов Ю.Х., Корольченко Д.А., Евич А.А. Условия возникновения пожара в помещении при газовом взрыве. Экспериментальные данные // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. — 2020. — Т. 29, № 1. — С. 9–21. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.9-21.

9. Kai Yang, Qianran Hu, Siheng Sun, Pengfei Lv, Lei Pang. Research progress on multi-overpressure peak structures of vented gas explosions in confined spaces // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. -2019.-Vol. 62. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103969.

10. Горев В.А., Салымова Е.Ю. О возможности вибрационного горения при внутренних взрывах // Пожаровзрывобезопасность. — 2017. — Т. 26, № 5. — С. 13-20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.05.13-20.

11. Термодинамика пожаров в помещениях / В.М. Астапенко, Ю.А. Кошмаров, И.С. Молчадский, А.Н. Шевляков. Под ред. Ю.А. Кошмарова. — М.: Стройиздат. - 1988. — 448 с. ISBN 5-274-00703-1.

12. СП 369.1325800.2017. Платформы морские стационарные. Правила проектирования.

13. Мельников А.В., Сафонов В.С. Методологические аспекты обоснования показателей взрывопожароустойчивости при авариях на морских платформах // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». - 2013. - № 3(14). - С. 220-227.

14. Мордвинова А.В. Пожарная безопасность морских стационарных нефтегазо-добывающих платформ: дисс. кандидата технических наук. Москва. - 2015. -207 с.

15. Polandov Iu. H., Korolchenko A. D. About the Danger of Vibration Combustion in Gas Explosions in the Room. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1425 (2020) 012010 DOI:10.1088/1742-6596/1425/1/012010

16. Komarov A.A., Gromov N.V., Korolchenko O.N. Ensuring blast resistance of critically important buildings and constructions in case of air crash. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE).

Сведения об авторах

Корольченко Дмитрий Александрович, доцент, заведующий кафедрой Комплексной безопасности в строительстве, директор Института комплексной безопасности в строительстве НИУ МГСУ, E-mail: da-vip@mail.ru, тел. 8 903 589 07 64

Евич Андрей Андреевич, аспирант НИУ МГСУ, инженер испытательной лаборатории Института комплексной безопасности в строительстве НИУ МГСУ, E-mail: klaus8807@mail.ru, тел. 8 916 978 95 99