

УДК 614.8.084  
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2021.94.13.008

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВА ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*Крехов А.А.<sup>1</sup>, Клочков С.В.<sup>1</sup> к.ф.-м.н., доцент, Минкин А.Н.<sup>1,2</sup> к.т.н., доцент,  
Чистова Е.В.<sup>1</sup>, Пашкина Т.М.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России

**Аннотация.** В статье анализируется зависимость мощности взрыва газозвдушной смеси от начальных параметров этой смеси посредством применения датчика контроля теплового потока. Определяется наиболее опасная концентрация в условиях низких температур. Исследуется изменение величины теплового потока в начальный момент взрыва при разных условиях.

**Ключевые слова:** взрыв при низких температурах, газозвдушная смесь, дефлаграционный взрыв, концентрационные пределы взрываемости, показатели ударной волны, датчик контроля теплового потока.

## INVESTIGATION OF EXPLOSION PARAMETERS AT LOW TEMPERATURES

*Krekhov A.A.<sup>1</sup>, Klochkov S.V.<sup>1</sup> Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Docent, Minkin A.N.<sup>1,2</sup>  
Ph.D. of Engineering Sciences, Docent, Chistova E.V.<sup>1</sup>, Pashkina T.M.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>FSAEI HE Siberian Federal University

<sup>2</sup>FSBEE HE Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia

**Abstract.** In the given article, the dependences of gas-air mixture explosion power of on the initial parameters are analyzed. The usage of heat flow control sensor for determining the most dangerous concentration of gas-air mixture is at low temperatures is discussed. The heat flux's magnitude changes at the initial moment of the explosion under different conditions are investigated.

**Key words:** Low temperature explosion, gas-air mixture, deflagration explosion, concentration explosion limits, shock wave indicators, heat flow control sensor

В настоящее время разработаны методики [1] определения динамики возникновения взрыва газозвдушных смесей в природной среде при так называемых «нормальных условиях». Однако влияние низких температур на развитие процесса взрыва, на ранней стадии протекания, достаточно слабо изучены. В связи с этим актуальной проблемой становится изучение влияния низких температур на динамику взрыва и горения газозвдушной смеси при интенсивном освоении месторождений Крайнего Севера.

Следует отметить, что при крайне низких температурах окружающей среды, высокомолекулярные соединения природного газа остаются в сжиженном состоянии, а в атмосферу испаряются низкомолекулярные органические соединения, в том числе эфиры, распространение пламени по которым, происходит с большей, чем в нормальных условиях, скоростью. Данная работа будет посвящена исследованию влияния низких температур на

параметры возникновения взрыва газовой смеси посредством фиксации значения теплового потока (далее – ТП).

В качестве фиксирующего прибора был выбран датчик контроля теплового потока (далее – ДКТП), параметры и технические возможности которого представлены в патенте [2], а также подробно описаны в работах [3-5].

Для получения экспериментальных данных посредством вышеописанного оборудования была разработана принципиальная схема испытательного стенда (рисунок 1).

В основу эксперимента принят двадцатиметровый полиэтиленовый двухслойный рукав (выполненный в форме трубы) с запаянными торцами (1). Диаметр трубы принят равным 1 м, толщина стенки 1 мм.

На равном расстоянии (Рис.1) устанавливались предварительно откалиброванные ДКТП (согласно описанной в [5] методике), формирующие восемь точек фиксации значений теплового потока (далее – Точки 1...8).

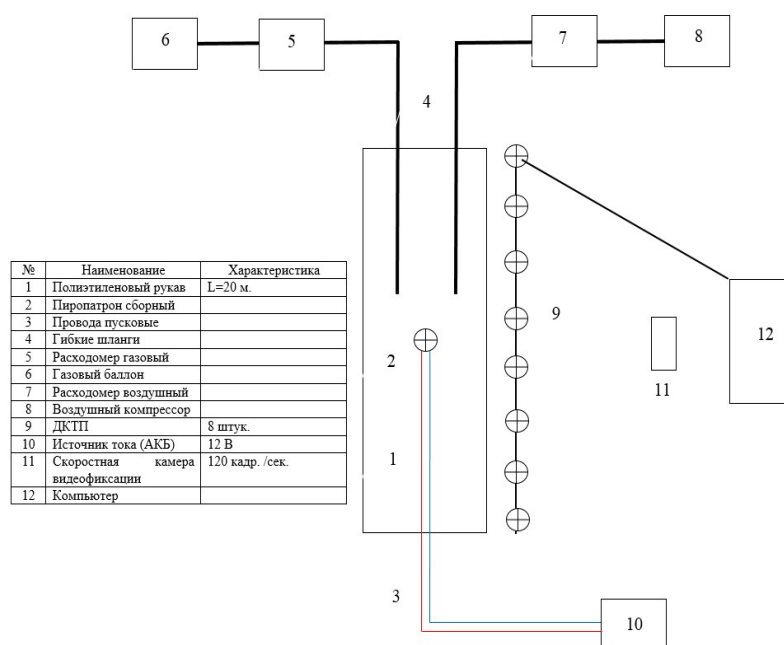


Рис.1. Принципиальная блок-схема испытательного стенда

Атмосферный воздух при помощи компрессора (8) через газовый шланг (4) и газовый расходомер диафрагменный с температурной компенсацией (5) поступает в полиэтиленовый рукав (трубу) с одного из торцов до появления натяжения стенок.

Параллельно с подачей атмосферного воздуха через соседний газовый шланг осуществляется подача природного газа (6) для образования однородности среды в рукавной линии. В рукавную линию помещался источник инициализации горения (2) и производилась герметизация рукава.

Объем рукава являлся постоянной величиной и составлял 15,7 м<sup>3</sup>. Для экспериментальной установки принято решение проведения реакции взрыва с шагом 1,5 % объема газа. Величины газа и воздуха представлены в сводной табл.1.

**Таблица 1. Численная величина концентрации ГВС**

Порядковый номер	Концентрация газа		Концентрация кислорода	
	%	м <sup>3</sup>	%	м <sup>3</sup>
1	2	0,31	98	15,39
2	3,5	0,55	96,5	15,15
3	5	0,79	95	14,92
4	6,5	1,02	93,5	14,68
5	8	1,26	92	14,44
6	9,5	1,49	90,5	14,21

В результате анализа метеоданных были выбраны следующие условия проведения эксперимента:

- для выявления динамики развития взрыва интервал температурных показаний принят от +30°С до -42°С (по возможности ниже);
- шаг температур составляет 10°С для каждого блока испытаний;
- отсутствие осадков, минимальный ветер (или штиль);
- с учетом особенностей фиксирующего оборудования (в т.ч. высокоскоростных видеокамер) только дневное время.

Каждое испытание состояло из пяти реализаций взрыва, посредством срабатывания источника инициализации горения согласно табл.2.

**Таблица 2. Проведение взрыва ГВС**

№ варианта реализации взрыва	Концентрационный предел взрываемости (%)	Уточнение
Вариант 1	2,0	Варианты по 3,5 и 5,0 % получили идентичные численные величины, поэтому концентрационный предел взрываемости 5,0 % не учитывается
Вариант 2	3,5	
Вариант 3	6,5	
Вариант 4	8,0	
Вариант 5	9,5	

Погодные условия подбирались с учетом возможности охвата всего вероятного диапазона температурных показаний окружающей среды. Также в учет, для увеличения точности измерений, принимались следующие характеристики:

- направление и скорость ветра (м/с) минимальны (штиль);
- отсутствие осадков.

Эксперименты проводились в летнее и зимнее время для трех типов начальных условий:

1. После заполнения объема рукава газозвушной смесью производится выдержка в 600 с для образования однородной смеси и разделения газа на фракции (только при отрицательной температуре);

2. После заполнения объема рукава газозвушной смесью выдержка не производится (происходит мгновенная детонация объема);

3. В объем рукава устанавливаются турбулизаторы и после заполнения объема рукава газозвушной смесью производится детонация без выдержки.

В первом случае, после образование облака с присутствующим в нем горючим компонентом в смеси с окислителем в определенном диапазоне концентраций, как правило, следует взрыв газоздушных смесей. Показатели ударной волны за пределами взрывного облака и динамика процесса горения газовой смеси определяются физико-техническими свойствами ГВС, формой и объемом облака на момент взрыва, а также местом возникновения взрыва (у центра или края облака).



*Рис. 2. Испытания первого типа в зимнее время*

При выполнении выдержки газоздушной смеси происходит ее разделение путем фракционной конденсации. В результате происходит обогащение относительно менее летучими (высококипящими) компонентами, а несконденсировавшийся пар - более летучими (низкокипящими). За счет этого, в большей степени, происходит «горение» нижней фракции и мгновенное приращение (взрыв) верхней, за счет чего мощность взрыва усиливается.

Во втором случае, без выполнения выдержки газоздушной смеси, ее разделение на фракции не происходит. За счет этого происходит дефлаграционный взрыв [6].



*Рис. 3. Испытания второго типа в зимнее время*

В последнем случае, мощность протекания дефлаграционного взрыва, значительно возрастает [6] и можно сделать вывод, что, в случае аварийной ситуации на производственном объекте нефтегазового комплекса, при наличии вблизи источника аварии или в селитебной зоне (подпадающей под зону действия взрыва) зданий и строений, поражающая зона увеличится.



*Рис. 4. Испытания третьего типа в зимнее время*

Проведенный блок экспериментов был реализован при концентрациях, указанных в табл. 2, что является нижним и верхним концентрационным пределами (далее - КП). Стоит отметить, что максимальное значение теплового потока при отрицательной температуре смещено в область пределов близких к верхнему. При положительных температурах значение находится ближе к середине интервала КП. Как видно из рисунка 5, концентрация 8,0% имеет наиболее мощный характер протекания взрыва.

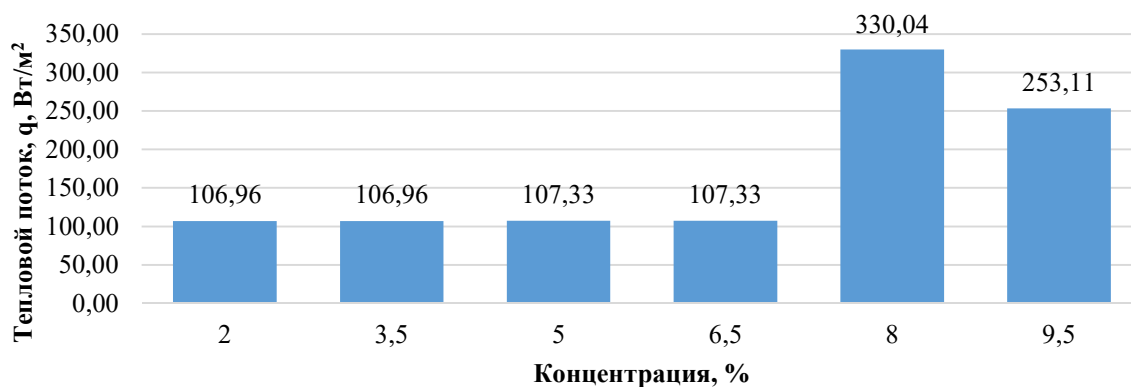


Рис. 5. Зависимость полученных в Точке 1 данных от концентрации

На рисунке 6 представлены экспериментальные зависимости значений ТП, полученные для концентраций 2% и 8%. Как можно заметить, величины тепловых потоков в начальный момент времени отличаются более чем в 3 раза.

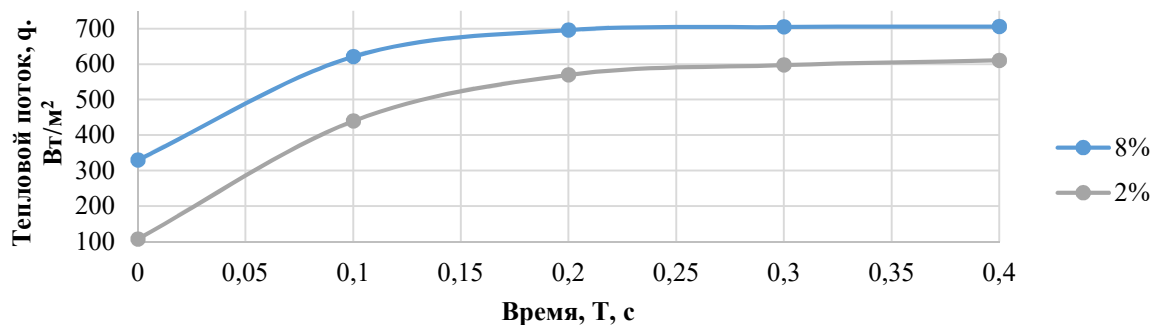


Рис. 6. Экспериментальные данные ДКТП полученные при концентрациях газа 8,0 и 2,0 % от основного объема рукава

Распределение значений ТП на для различных температурных режимов для значения концентрации 8% представлено на диаграмме ниже.

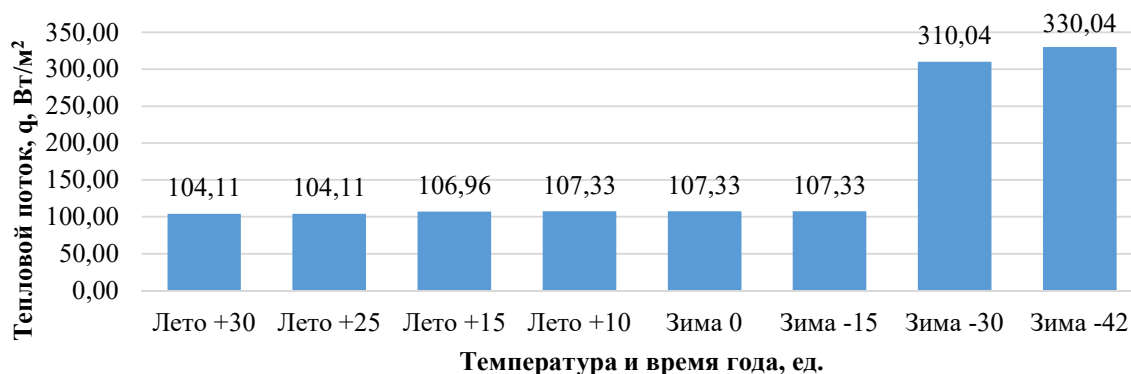


Рис. 7. Зависимость полученных в Точке 1 данных от температуры

Для граничных значений наблюдаемого температурного интервала усредненная картина изменения величины теплового потока во времени по всем фиксируемым точкам представлена на следующем графике.

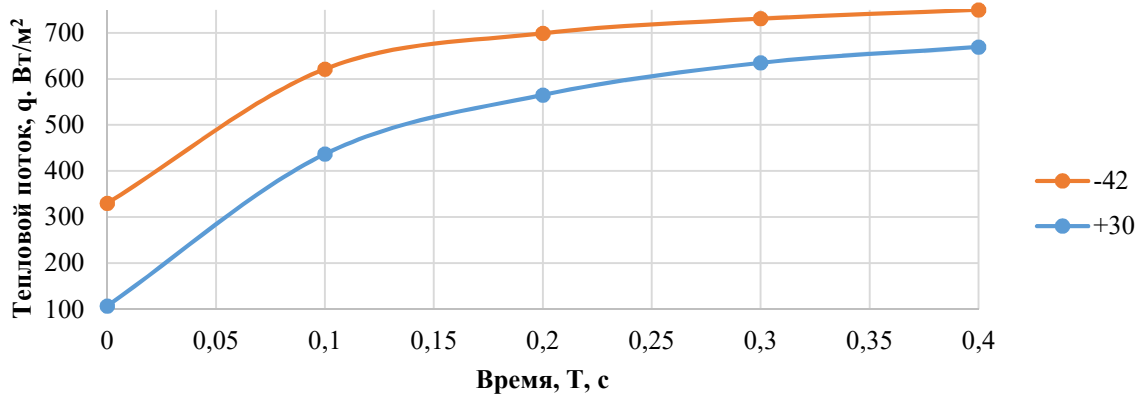


Рис. 8. Экспериментальные данные значения ТП, полученные при температурах -42 °C и +30 °C (концентрация 8,0 %)

Достоверность показаний ДКТП оценивалось по соотношению десятикратного повторения каждого испытательного стенда при идентичных метеорологических условиях (температура окружающей среды, влажность воздуха, наличие и скорость ветра), идентичной концентрации газовой смеси и определении абсолютной и относительной погрешностей. С применением ЭВМ «Advanced Grapher» и «Excel» были вычислены среднее квадратичное отклонение, коэффициент корреляции, коэффициент регрессии и средняя погрешность аппроксимации.

По формуле (1) определены величины случайной ошибки результата измерения при n наблюдениях (за основу принят способ средней квадратичной ошибки).

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}, \quad (1)$$

где n – число наблюдений;  
 $\bar{x}$  - среднее арифметическое значение показателя;  
 $x_i$  - результаты наблюдений.

Среднее значение каждого из показателя определяли по (2) как среднее арифметическое из полученных результатов наблюдений:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2)$$

Абсолютная погрешность рассматриваемого прибора определена, как разность между средним арифметическим значением каждого из показателей и значением, полученным при отдельном наблюдении  $x_{от.набл.}$  по формуле:

$$\Delta x_i = \left| \bar{x} - x_{от.набл.} \right|, \quad (3)$$

Относительная погрешность определяется как отношение средней квадратичной ошибки к среднему арифметическому значению показателей:

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta x_i}{\bar{x}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

Для установления случайной ошибки необходимы данные в части доверительного интервала и величины доверительной вероятности, которая оценивает величину надежности полученных значений. При измерениях можно ограничиться доверительной вероятностью  $\alpha=0,95$ , которой соответствует доверительный интервал в долях  $\omega=2,0$ . Для измерений показателей каждого наблюдения при соответствующей температуре испытания доверительный интервал  $\Delta \tau_x^-$  определяется по формуле:

$$\Delta \tau_x^- = S_n \cdot \omega, \quad (5)$$

Статистическая обработка результатов при десяти наблюдениях с указанием доверительного интервала представлена на нижеследующем графике:

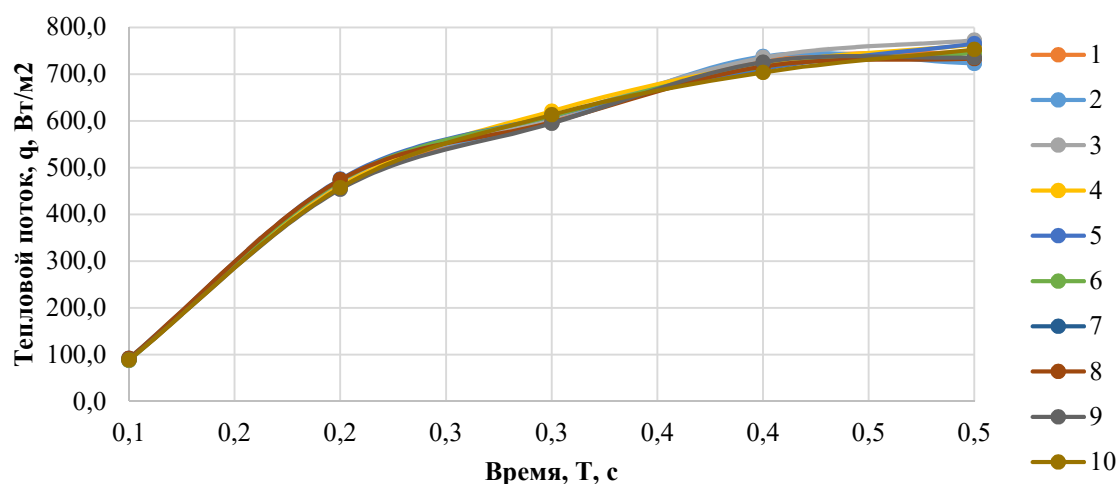


Рис. 9. Зависимости мощности теплового потока газовой смеси ( $Вт/м^2$ ) от времени протекания процесса взрыва при температуре  $+30^{\circ}C$  (количество повторений опыта – 10)

Для остальных температур были получены аналогичные результаты.

Таким образом, в ходе работы были определены наиболее опасные концентрационные пределы взрываемости газовой смеси при отрицательных температурах окружающей среды. Также авторами выявлены закономерности протекания процессов взрыва при различных начальных параметрах концентрации и температуры окружающей среды. Результаты исследования планируется использовать, в том числе, для анализа пожарной опасности магистральной линии газопроводов и моделирования взрыва газовой смеси в замкнутом объеме.

## Литература

1. Безбородов, Ю.Н. Метод и средства контроля фиксации взрыва газовой смеси в условиях низких температур / Ю.Н. Безбородов, А.А. Крехов // Молодая нефть : материалы IV Всерос. молодежной научн.-техн. конф. нефтегазовой отрасли (Красноярск, 20 мая 2017 года). – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. – С. 362–366.

2. Патент № RU 195452 U1 Российская Федерация, МПК G08B 17/113 (2006.01). Датчик контроля теплового потока : № 2019123250 : заявл. 18.07.2019 : опубл. 28.01.2020 / Крехов А.А., Клочков С.В., Минкин А.Н., Едимичев Д.А. ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». – 6 с. : ил.

3. Крехов, А.А. Применение датчика контроля теплового потока для раннего обнаружения образования взрывной концентрации газозвушной смеси в условиях низких температур / А.А. Крехов, Ю.Н. Безбородов, С.В. Клочков, А.Н. Минкин // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2019. – № 2. – С. 33-38.

4. Krekhov, A.A The upgrade heat flux sensor application for early fire detection / A.A. Krekhov, S.V. Klochkov, A.N. Minkin, S.N. Masaev. – DOI: 10.1088/1742-6596/1515/4/042111. // Journal of Physics: Conference Series, 2020. – Vol. 1515, Is. 4. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1515/4/042111> (дата обращения 20.09.2020).

5. Krekhov, A.A. Gas and air mixture explosion features exploration under low temperature conditions / A.A. Krekhov, Y.N. Bezborodov, S.V. Klochkov, A.N. Minkin. // Actual issues of polychotomic analysis, 2019. – P. 29-46.

6. ГОСТ Р 22.0.08-96. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Взрывы. Термины и определения : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 1997-07-01 / Госстандарт России. – Изд. официальное. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1996. – 8 с.