

К.Т.Н. ЛУЩИК А.П. / dr LUSHCHIK A.P.<sup>1</sup>К.Т.Н. АРЕСТОВИЧ Д.Н. / dr ARESTOVICH D.N.<sup>1</sup>

Przyjęty/Accepted/Принята: 11.12.2013;

Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 28.01.2014;

Opublikowany/Published/Опубликована: 31.03.2014;

## ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ТЕМПЕРАТУРЫ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГОРЮЧИХ ЖИДКОСТЕЙ<sup>2,3</sup>

### Application of the Statistical Methods for Determining the Self-ignition Temperature of Combustible Liquids

### Zastosowanie metod statystycznych w celu ustalenia temperatury samozapłonu cieczy palnych

#### Аннотация

**Цель:** Целью исследований являлась разработка расчетно-экспериментального метода определения вероятности самовоспламенения горючей жидкости, применяемой в технологическом процессе, вследствие ее возможного контакта с нагретой поверхностью. Актуальность исследований обусловлена отсутствием единого подхода к определению температуры самовоспламенения, поэтому оценка достоверности имеющихся экспериментальных данных затруднена, их использование на практике, а также в качестве исходных данных для разработки расчетных методов, не всегда правомочно.

**Методы:** Экспериментальная работа включала выполнение испытаний согласно ГОСТ-1313 (метод определения минимальной температуры самовоспламенения горючей жидкости) на «стандартной» установке, а также на модернизированной установке, отличающейся от «стандартной» тем, что закрытый реакционный сосуд заменяется открытым цилиндрическим стаканом, на дно которого размещается плоская цилиндрическая пластинка толщиной 5 мм из испытуемого материала, при этом температура пластинки контролируется и измеряется термопарой, а одиночные капли испытуемой жидкости выдавливаются из пипетки с высоты 15 см и падают на центр пластинки. Для обработки результатов экспериментов использовалась логистическая регрессионная модель, связывающая вероятность самовоспламенения горючей жидкости от нагретой поверхности с предикторами (условия проведения экспериментов, совпадающие с условиями технологического процесса). Для апробации вероятностного подхода к определению температуры самовоспламенения горючих жидкостей были выполнены тестовые испытания по самовоспламенению дизельного топлива ДВТ. Исследовалось самовоспламенение навесок десяти разных объемов (0,1 мл., 0,2 мл., ..., 1,0 мл) в диапазоне температур 247 °С – 266 °С через один градус (по 5 испытаний для каждой температуры). Результаты исследований показали хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных.

**Результаты:** Таким образом, разработан новый расчетно-экспериментальный метод, который позволяет предсказывать вероятность наступления самовоспламенения горючей жидкости в том или ином технологическом процессе. На основе предложенного подхода предполагается создание программного кода. Данные исследования позволяют произвести категоризацию технологических процессов по их пожароопасности. В качестве критерия безопасности будет служить температура нагретой поверхности материала, при которой самовоспламенение происходит с определенной степенью вероятности.

**Ключевые слова:** температура самовоспламенения, технологический процесс, вероятность самовоспламенения, регрессионная модель, принцип максимума правдоподобия

**Вид статьи:** тематическое исследование - анализ реальных событий

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем ЧС МЧС Республики Беларусь / The Establishment «Research Institute of Fire Safety and Emergencies» of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus; address: 220046, г. Минск ул. Солтыса, 183а; tel. (+375 17) 246 43 99

<sup>2</sup> Процентное соотношение участия в подготовке статьи: Лущик А.П. – 70%, Арестович Д.Н. – 30% / Percentage contribution: Lushchik A.P. – 70%, Arestovich D.N. – 30%

<sup>3</sup> Artykuł został wyróżniony przez Komitet Redakcyjny / The article was recognised by the Editorial Committee / Эту статью наградила Редакционный Совет

**Abstract**

**Purpose:** The purpose of this research was to develop a calculation-experimental method of determining the probability of self-ignition of flammable liquids. The article discusses self-ignition of liquids involved in the technological process that occurs as result of their contact with a heated surface. The relevance of the conducted research is supported by the fact that there is no unified approach for determining the temperature of spontaneous ignition. For this reason the assessment of the reliability of the existing experimental data and its practical use, e.g., in the form of initial data for the development of calculation methods is not always possible.

**Methods:** Experimental work included the carrying out the tests according to GOST-1313 (a method for determining the minimum temperature at which the flammable liquid will spontaneously ignite) on the «standard» experimental stand, as well as the modernised experimental stand which differs from the «standard» by the fact that the closed reaction vessel is replaced with an opened cylindrical glass on the bottom of which there is a flat cylindrical plate 5 mm thick made of the tested material. Plate's temperature is controlled and measured with a thermocouple. Single drops of the liquid are squeezed out of the pipette from a height of 15 cm and fall on the center of the plate. For the analysis of the results the authors used the logistic regression model that relates the probability of flammable liquid self-ignition from a heated surface with the predictors (experimental conditions, coinciding with the terms of the technological process). For the approbation of the probabilistic approach to the definition of the self-ignition temperature of combustible liquids were executed test to spontaneous combustion of diesel fuel DWT. Investigation of the self-ignition hanging ten different volumes (0,1 ml, 0,2 ml, ..., 1.0 ml) in the temperature range 247°C - 266°C through one degree (5 tests for each temperature). The results showed good agreement between the calculated and experimental data.

Thus, a new calculation-experimental method, which allows to predict the probability of ignition fluids combustible in a particular technological process. On the basis of the proposed approach is expected to create a program code. Research data allow the categorization of technological processes according to their fire risk. As a criterion security will serve the temperature of a heated surface at which ignition occurs with a certain degree of probability.

**Keywords:** self-ignition temperature, technological process, probability of ignition, regression model, the likelihood principle

**Type of article:** case study – analysis of actual events

**Abstrakt**

**Cel:** Celem badań było opracowanie eksperymentalno-obliczeniowej metody określania prawdopodobieństwa samozapłonu stosowanych w procesie technologicznym płynów palnych wskutek ich kontaktu z rozgrzaną powierzchnią. Konieczność przeprowadzenia takich badań potwierdza brak jednolitego podejścia do określenia temperatury samozapłonu. Z tego powodu trudno ocenić miarodajność dotychczasowych danych eksperymentalnych, a ich wykorzystanie w praktyce, także w roli danych wyjściowych przy opracowaniu metod obliczeniowych, nie zawsze jest możliwe.

**Metodologia:** Praca eksperymentalna polegała na przeprowadzeniu badań zgodnie ze standardem GOST-1313 (metoda określenia minimalnej temperatury samozapłonu łatwopalnego płynu) na standardowym stanowisku oraz na zmodernizowanym stanowisku, różniącym się od standardowego tym, że zamknięte naczynie reakcyjne zamienione zostało na naczynie cylindryczne, na którego dnie umieszczona została płaska cylindryczna płytką o grubości 5 mm, zrobiona z badanego materiału. Temperatura płytki była mierzona i kontrolowana za pomocą termopary, a pojedyncze krople badanej cieczy wprowadzane pipetką z wysokości 15 cm i opadały na środkową część płytki. W celu opracowania wyników eksperymentów posłużono się logistycznym modelem regresyjnym łączącym prawdopodobieństwo samozapłonu cieczy palnej od rozgrzanej powierzchni ze zmienną objaśniającą (eksperyment przeprowadzono w warunkach procesu technologicznego). Aby potwierdzić efektywność metody służącej do określenia temperatury samozapłonu cieczy łatwopalnych przeprowadzono badania eksperymentalne samozapłonu paliwa diesel DVT. Badano samozapłon próbek o dziesięciu różnych pojemnościach (0,1 ml, 0,2 ml, ..., 1,0 ml) w zakresie temperatur 247°C - 266°C co jeden stopień (po 5 badań dla każdej wartości temperatury). Wyniki badań wykazały dobrą zgodność pomiędzy danymi uzyskanymi w drodze eksperymentów a danymi obliczeniowymi.

**Wyniki:** W ten sposób opracowano nową eksperymentalno-obliczeniową metodę, która pozwala przewidzieć prawdopodobieństwo wystąpienia samozapłonu cieczy palnej podczas wybranego procesu technologicznego. Na podstawie omawianego podejścia planuje się opracować kod programowy. Opisane badania pozwolą skategoryzować procesy technologiczne ze względu na ich ryzyko pożarowe. Jako kryterium bezpieczeństwa służyć będzie temperatura rozgrzanej powierzchni materiału, przy której, w określonym stopniu prawdopodobieństwa następuje samozapłon.

**Słowa kluczowe:** temperatura samozapłonu, proces technologiczny, prawdopodobieństwo samozapłonu, model regresyjny, zasada maksymalnego prawdopodobieństwa

**Typ artykułu:** studium przypadku – analiza zdarzeń rzeczywistych

**1. Введение**

Технологические процессы, протекающие на многих производствах в Республике Беларусь отличаются высокой насыщенностью электродвигателями, осветительными приборами, электронагревателями, большим количеством коммуникаций и другими электроустановками. В связи с этим, значительная часть пожаров и взрывов происходит из-за неисправности электрооборудования. Ошибки при выборе типа взрывозащищенного электрооборудования, нарушения правил

эксплуатации электроустановок могут привести к появлению источника зажигания и его контакту с жидкой горючей средой, который в свою очередь может привести к взрыву и пожару.

Взрывозащищенное электрооборудование делится на категории в зависимости от „безопасного экспериментального максимального зазора” и группы взрывоопасной смеси газов и паров жидкостей с воздухом, которые определяются по температуре самовоспламенения, определяемой стандартным методом. В соот-

ветствии с группой взрывоопасной смеси устанавливают максимально допустимую температуру нагрева поверхностей электрического оборудования во взрывоопасных помещениях и в наружных установках, если с этими поверхностями возможен контакт жидкой взрывоопасной среды.

По значениям температур самовоспламенения также вычисляют предельно допустимую температуру нагрева поверхностей технологического оборудования и трубопроводов, что имеет большое значение при разработке пожарно-профилактических мероприятий, связанных с высокотемпературным нагревом вещества.

В настоящее время различные методы экспериментального определения температуры самовоспламенения резко отличаются друг от друга условиями нагрева горючей смеси, влиянием стенок реакционного сосуда, временем, отводимым для саморазгона реакции и т. д. Поэтому значения температур самовоспламенения, полученные различными методами, могут сильно отличаться. Разброс экспериментальных данных, полученных различными методами, весьма существен и может достигать 300 °С. Кроме того существуют явные несоответствия в нормативных документах, касающихся метода экспериментального определения температуры самовоспламенения. Многолетние исследования температур самовоспламенения жидкостей показывают, что воспроизводимость результатов не всегда соответствует требованиям стандартного метода. Приводимые в литературе данные чаще всего вообще не имеют ссылок на метод испытаний. Поэтому оценка достоверности имеющихся экспериментальных данных затруднена, и их использование на практике, а также в качестве исходных данных для разработки расчетных методов, не всегда правомочно.

Вопросу практического использования значений температуры самовоспламенения, полученных стандартными методами посвящено много работ. Перенесение результатов определения температуры самовоспламенения по стандартной методике на реальные ситуации является исключительно сложной задачей (в большинстве случаев на практике температура самовоспламенения оказывается значительно более высокой) и в каждом конкретном случае подходить к обеспечению пожаровзрывобезопасности объектов надо индивидуально.

Так Американский институт нефти предлагает считать, что для поджигания горючей жидкости нагретой поверхностью на открытом воздухе, ее температура должна превышать минимальную температуру самовоспламенения на 200°С.

Действительно, эксперименты по самовоспламенению моторных и авиационных топлив нагретой поверхностью показывают, что это превышение может быть еще выше (см. таблица 1, 2).

Тот факт, что для воспламенения горючей жидкости температура нагретой поверхности должна быть выше минимальной температуры самовоспламенения, полученной на установках по ГОСТ 1313 можно объяснить следующим образом:

- тепловые потери в зоне реакции у нагретой поверхности, как правило происходят из-за теплообмена с окружающей средой комнатной температуры, тогда как в стандартной установке зона реакции окружена средой с высокой температурой;
- в реальных условиях нагретая поверхность часто обдувается воздушными потоками, которые переносят горючие пары от поверхности и уменьшают их время контакта с зоной высокой температуры.

Следует отметить, что процесс самовоспламенения горючих жидкостей в реальных технологических процессах и аппаратах носит вероятностный характер и зависит от случайного размера, формы и количества капель, попадающих на нагретую поверхность, от случайного распределения температуры поверхности, от случайных параметров, определяющих условия на границе капля – нагретая поверхность и капля – окружающая воздушная среда, от случайной начальной температуры капель, от случайного состава горючей жидкости, имеющий разнородный состав (включения) и сложную неупорядоченную структуру. В этих материалах контактируют несколько веществ с различными теплофизическими характеристиками. Распределение включений является, случайным, поэтому их теплофизические характеристики необходимо рассматривать как случайные.

Таблица 1.

Моторные масла и топлива

Table 1.

Motor oils and fuel

Вещество (Substance)	Минимальная температура самовоспламенения по ГОСТ-1313, °С (The minimum ignition temperature GOST-1313, °C)	Температура нагретой поверхности, при которой происходит самовоспламенения, °С (Temperature of a heated surface at which ignition occurs, °C)
Моторное масло (Engine oil)	260-371	525-580
Трансмиссионная жидкость (Transmission fluid)	410-417	450-640
Газолин (Gasoline)	280-372	590-690
Дизельное топливо (Diesel fuel)	257	500-650
Антифриз (Antifreeze)	413	520-620

Таким образом, для определения пожароопасности, связанной с самовоспламенением горючих жидкостей в реальных технологических процессах целесообразно использовать статистические методы оценки, основанные на установлении зависимости между основными факторами, определяющими самовоспламенение, и вероятностью самовоспламенения [1].

**Таблица 2.**  
Авиационные топлива

**Table 2.**  
Aviation fuels

Вещество (Substance)	Минимальная температура самовоспламенения по ГОСТ-1313, °C (The minimum ignition temperature GOST-1313, °C)	Температура нагретой поверхности, при которой происходит самовоспламенения, °C (Temperature of a heated surface at which ignition occurs, °C)
MIL-H-5606	218	540-670
MIL-H-83282	365	490-610
MIL-L-7808	365	550-620
JP-8	223	450-610
JetA	238	510-620
Авиационный керосин (Aviation kerosene)	440	550-750

Экспериментальные исследования следует проводить на установке, моделирующей условия, максимально приближенные к реальному технологическому процессу. Капли данной горючей жидкости из дозирующего устройства должны падать с определенной высоты на нагретые подложки из разных материалов. Для статистической обработки необходимо проводить серии испытаний по самовоспламенению различных горючих жидкостей с подложками из разных материалов при разных температурах нагрева подложки.

## 2. Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментов по определению вероятности зажигания горючей жидкости, применяемой в технологическом процессе, вследствие ее контакта с нагретой поверхностью, предлагается использовать установку, модернизированную в НИИ ПБ и ЧС. На первом этапе испытаний стандартным методом по ГОСТ-1313 определяется минимальная температура самовоспламенения испытуемой горючей жидкости (рисунок 1). В модернизированной установке закрытый реакционный сосуд заменяется открытым цилиндрическим стаканом, на дно которого размещается плоская цилиндрическая пластинка толщиной 5 мм из испытуемого материала (например, сталь 45, алюминиевый сплав Д16, латунь, полипропилен высокого давления) (рисунок 2). Температура пластинки контролируется и измеряется термопарой. Одиночные капли испытуемой жидкости выдавливаются из пипетки и с высоты 15 см падают на центр пластинки. Для исследования капель разного размера используются пипетки разных диаметров. Предварительно определяется средний размер капли по объему жидкости, выдавленной из пипетки и числу образовавшихся капель. Испытания на самовоспламенение начинаются с нагрева пластинки до температуры несколь-

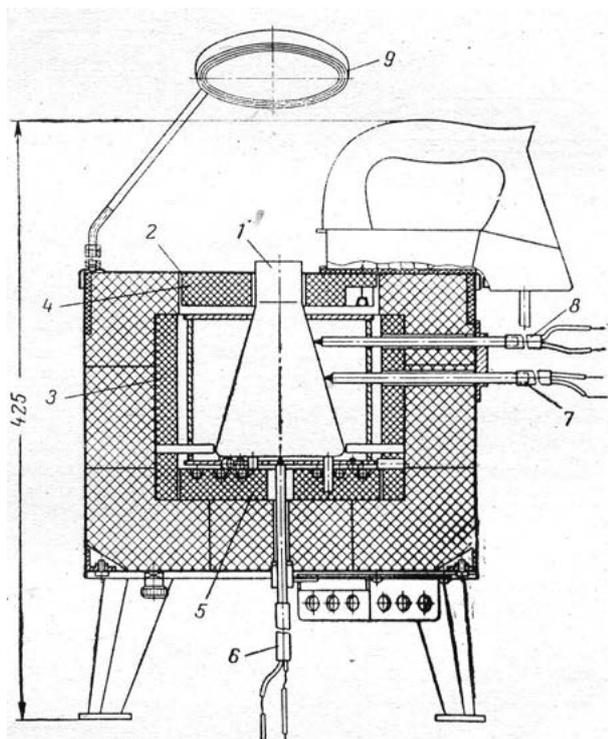
ко ниже минимальной температуры самовоспламенения, определенной вначале по ГОСТ (ниже на 30 градусов Цельсия). При данной температуре пластинки проводят пять испытаний и в каждом из них фиксируют результат: произошло или нет зажигание в течение 5 минут, после попадания капли на нагретую поверхность. Время между двумя последовательными испытаниями должно быть не менее 15 секунд. Результаты испытаний заносят в таблицу, приписывая случаю воспламенения значение 1, а случаю отсутствия воспламенения значение 0. Затем повышают температуру пластинки на 10 градусов и вновь проводят пять испытаний. Для данного размера капли проводится 165 испытаний (по пять испытаний для каждой из 33 температур поверхности пластинки). Затем сменяется пипетка и для нового размера капли повторяется весь цикл исследований.

На основе полученных результатов для каждого объема капли строится матрица, состоящая из двух столбцов и 165 строк, которая используется для обработки данных методом логистической регрессии и получения набора зависимостей, определяющих вероятности самовоспламенения от температуры нагретой поверхности.

Результаты испытаний моторного масла М-13-13 на самовоспламенение от нагретой поверхности (сталь 45) приведены в таблице 3.

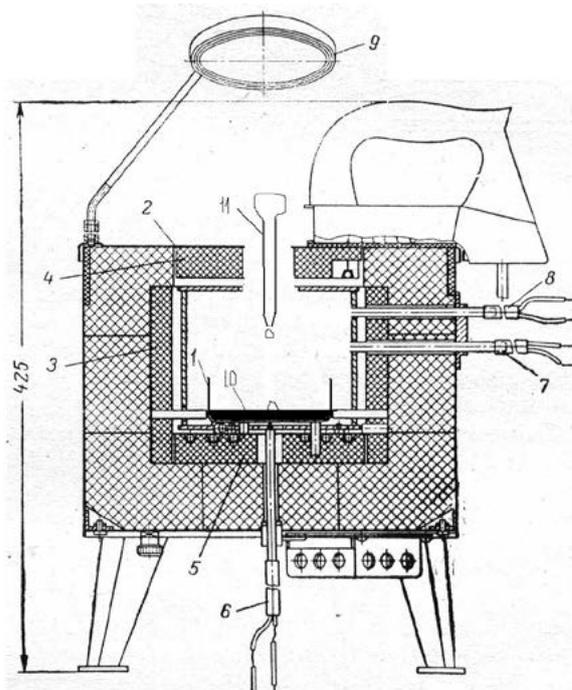
Из-за вероятностного характера зажигания жидкости в тесте с идентичными условиями жидкость может либо зажечься, либо нет. Испытанию, когда происходит зажигание, придается значение 1, а когда нет – значение, равное 0. В качестве предикатов используются условия проведения теста (условия технологического процесса):

- температура окружающей среды;
- давление окружающей среды;
- начальная температура горючей жидкости;
- химический состав горючей жидкости;
- наличие или отсутствие воздушных потоков (конвекция);
- стехиометричность смеси;
- размер и количество капель, попадающих на нагретую поверхность
- и параметры источника зажигания (нагретой поверхности):
- температура поверхности;
- материал поверхности;
- время контакта капли и поверхности;
- размер поверхности;
- шероховатость поверхности;
- каталитические свойства поверхности;
- ориентация поверхности.



1 – реакционный сосуд (reaction vessel);  
 2 – нагревательная печь (heating furnace);  
 3 – основной нагреватель (main heater);  
 4 – верхний нагреватель (upper heater);  
 5 – нижний нагреватель (lower heater);  
 6–8 – термопары (thermocouple);  
 9 – смотровое зеркало (viewing mirror)

**Рис. 1.** Схема установки НИИ ПБ и ЧС для определения стандартной температуры самовоспламенения  
**Fig. 1.** Installation Scheme of RIFSE for determination of the standard inflammation temperature)



1 – реакционный сосуд (reaction vessel);  
 2 – нагревательная печь (heating furnace);  
 3 – основной нагреватель (main heater);  
 4 – верхний нагреватель (upper heater);  
 5 – нижний нагреватель (lower heater);  
 6–8 – термопары (thermocouple);  
 9 – смотровое зеркало (viewing mirror)  
 10 – цилиндрическая шайба из испытуемого материала (cylindrical washer from the test material);  
 11 – пипетка (measuring pipette)

**Рис. 2.** Схема модернизированной установки НИИ ПБ и ЧС для определения стандартной температуры самовоспламенения  
**Fig. 2.** Scheme of the modernized for determination of the standard inflammation temperature)

**Таблица 3.**

Результаты испытаний моторного масла М13-13 на самовоспламенение от нагретой поверхности (сталь 45)

**Table 3.**

Tests results of motor oil M13-13 on the self-ignition from the hot surface (steel 45)

Температура поверхности, °C (The surface temperature °C)	Объем капли (Volume of the drop)				
	20 $\mu$ L, $r = 1,68mm$	30 $\mu$ L, $r = 1,93mm$	40 $\mu$ L, $r = 2,1mm$	50 $\mu$ L, $r = 2,29mm$	60 $\mu$ L, $r = 2,43mm$
$T_{min} - 30$	0	0	0	0	0
	0	0	1	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	1	0
	0	0	0	0	1
$T_{min} - 20$	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	1	0	0
	0	1	0	0	0
	0	0	0	1	0
$T_{min} - 10$	0	1	0	0	1
	1	0	0	0	1
	1	0	1	0	0
	0	0	1	1	0
	0	0	0	1	0

### 3. Вероятностный подход к определению температуры самовоспламенения

Для обработки результатов экспериментов предлагается использование логистической регрессионной модели [2], предназначенной для решения задачи предсказания значений непрерывной зависимой переменной при условии, что эта зависимая переменная может принимать значения в интервале от нуля до единицы. В силу такой специфики логистическая регрессия может быть использована для предсказания вероятности наступления некоторого события (в нашем случае самовоспламенения горючей жидкости от нагретой поверхности с температурой  $T_{i\dot{a}}$ ) в зависимости от значений некоторого числа факторов (предикторов):  $(x_1, x_2, \dots, x_m)$ .

В качестве предикторов рассматриваются условия проведения экспериментов (совпадающие с условиями технологического процесса): (температура окружающей среды; давление окружающей среды; начальная температура горючей жидкости; наличие или отсутствие конвекции; стехиометричность горючей смеси; размер капель, попадающих на нагретую поверхность и параметры источника зажигания; температура поверхности; материал поверхности; время и характер контакта капли и поверхности; шероховатость поверхности; каталитические свойства поверхности; ориентация поверхности).

В логистической регрессионной модели зависимость, связывающая вероятность самовоспламенения горючей жидкости от нагретой поверхности с предикторами, представляется в виде

$$b = g(b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_m x_m) \quad (1)$$

где  $b_i$  – параметры логистической регрессии,  $g(z)$  – логит-функция:  $g(z) = 1/(1 + \exp(-z))$ .

Для оценки параметров  $b_m$ , входящих в уравнение (1) можно использовать принцип максимума правдоподобия. Согласно этому принципу, за величины параметров  $b_m$  принимаются те их значения, при которых функции правдоподобия имеет максимум. Функция правдоподобия в нашем случае имеет следующий вид

$$L(\bar{b}) = \prod_{i=1}^n g(\bar{b}\bar{x}^i)^{y_i} [1 - g(\bar{b}\bar{x}^i)]^{1-y_i} \quad (2)$$

где приняты обозначения:

$$\bar{b} = (b_0, b_1, \dots, b_m),$$

$$\bar{x}^i = (1, x_1^i, \dots, x_m^i),$$

$$\bar{b}\bar{x}^i = b_0 + b_1 x_1^i + \dots + b_m x_m^i. \quad (3)$$

Для отыскания значений параметров, при которых достигается максимум функции (2), вычисляются частные производные по этим параметрам и приравняются к нулю. В результате получается следующая система уравнений:

$$\begin{cases} f_0(\bar{b}) \equiv \sum_{i=1}^n g(\bar{b}\bar{x}^i) - \sum_{\{i: y_i=1\}} 1 = 0 \\ f_j(\bar{b}) \equiv \sum_{i=1}^n g(\bar{b}\bar{x}^i) x_j^i - \sum_{\{i: y_i=1\}} x_j^i = 0 \quad (j=1, \dots, m) \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, нахождение параметров логит-регрессии сводится к решению системы нелинейных уравнений (4) относительно неизвестных параметров  $\bar{b}$  с использованием выборки, полученной в результате испытаний:

$$(x_1^i, x_2^i, \dots, x_m^i, y_i), \quad (i=1, \dots, n) \quad (5)$$

где  $y_i$  – значение отклика (наступления самовоспламенения (1) либо его отсутствия (0)),  $n$  – количество испытаний.

Для решения системы (4) используем метод Ньютона-Рафсона [3]. Метод предполагает выбор начального приближения решения и последовательное его улучшение в ходе выполнения ряда вычислений. Для выбора начального приближения оценим вероятность появления единицы (самовоспламенения) по следующей формуле

$$B_0 = \frac{\sum_{\{i: y_i=1\}} 1}{n} \quad (6)$$

То есть, оно равно количеству удачных исходов, разделенных на общее количество испытаний. Начальное приближение для параметров модели получим, если не будем учитывать влияния факторов вообще, то есть:

$$\bar{b}^0 = (\ln \frac{B_0}{1-B_0}, 0, \dots, 0), \quad (7)$$

Последовательные приближения вычисляются по следующей формуле, которая связывает очередное ( $q+1$ ) – приближение с предыдущим ( $q$ ) – приближением:

$$\bar{b}^{q+1} = \bar{b}^q - F(\bar{b}^q) J^{-1}(\bar{b}^q) \quad (8)$$

В соотношении (8) используется вектор  $F(\bar{b}^q) = (f_0(\bar{b}^q), f_1(\bar{b}^q), \dots, f_m(\bar{b}^q))$ , а также

матрица Якоби для системы уравнений (4), которая имеет следующий вид:

$$J(\bar{b}) = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n g(\bar{b}x^i)(1-g(\bar{b}x^i)), \sum_{i=1}^n g(\bar{b}x^i)(1-g(\bar{b}x^i))x_1^i, \dots, \sum_{i=1}^n g(\bar{b}x^i)(1-g(\bar{b}x^i))x_m^i \\ \sum_{i=1}^n g(\bar{b}x^i)(1-g(\bar{b}x^i))x_1^i, \sum_{i=1}^n g(\bar{b}x^i)(1-g(\bar{b}x^i))x_1^i x_1^i, \dots, \sum_{i=1}^n g(\bar{b}x^i)(1-g(\bar{b}x^i))x_m^i x_1^i \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n g(\bar{b}x^i)(1-g(\bar{b}x^i))x_m^i, \sum_{i=1}^n g(\bar{b}x^i)(1-g(\bar{b}x^i))x_1^i x_m^i, \dots, \sum_{i=1}^n g(\bar{b}x^i)(1-g(\bar{b}x^i))x_m^i x_m^i \end{pmatrix} \quad (9)$$

Следует отметить, что вместо того чтобы вычислять обратную матрицу, которая присутствует в соотношении (8), и которая требуется для вычисления величины  $D = F(\bar{b}^q)J^{-1}(\bar{b}^q)$ , более эффективно методом исключения Гаусса решать систему уравнений

$$DJ(\bar{b}^q) = F(\bar{b}^q) \quad (10)$$

Для решения системы (10) можно использовать метод Гаусса с выбором главного элемента по всей матрице коэффициентов. Вычисления прекращаются, когда на очередном шаге норма вектора  $D$  будет меньше некоторой заданной величины, характеризующей точность расчетов. Норма вектора  $D$ , очевидно характеризует разницу между соседними приближениями.

Для случая одного предиктора (температуры поверхности  $T_{ii\hat{a}}$ , на которую попадает горячая жидкость) получаем следующее соотношение определяющее вероятность самовоспламенения капли горячей жидкости на нагретой поверхности с температурой  $T_{ii\hat{a}}$ :

$$\delta(\dot{O}_{ii\hat{a}}) = \frac{\exp(b_0 + b_1 \cdot \dot{O}_{ii\hat{a}})}{1 + \exp(b_0 + b_1 \cdot \dot{O}_{ii\hat{a}})} \quad (11)$$

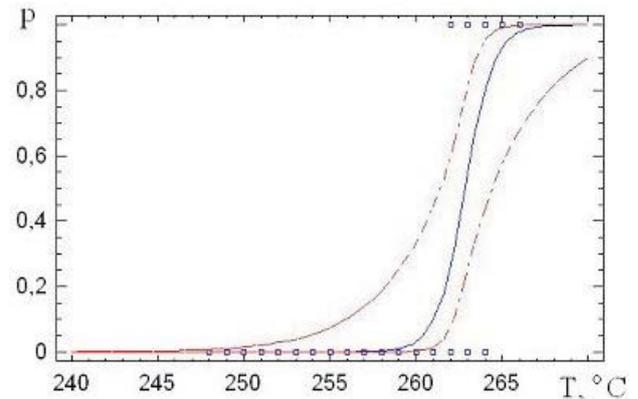
Значение температуры поверхности  $T_{ii\hat{a}}^{p*}$ , при которой самовоспламенение произойдет с определенной степенью вероятности  $p_*$  (например 95 %) можно получить из (11) в виде

$$T_{ii\hat{a}}^{p*} = \frac{1}{b_1} \cdot \ln \frac{p_*}{1-p_*} - \frac{b_0}{b_1} \quad (12)$$

#### 4. Апробация

Для апробации вероятностного подхода к определению температуры самовоспламенения горючих жидкостей на установке НИИ ПБ и ЧС были выполнены тестовые испытания по самовоспламенению дизельного топлива ДВТ. Исследовалось самовоспламенение навесок десяти разных объемов (0,1 мл., 0,2 мл., ..., 1,0 мл) в диапазоне температур 247°C – 266°C через один градус (по 5 испытаний для каждой температуры).

На рисунке 3 приведены результаты обработки с использованием логистической регрессии выборки этих экспериментальных данных.



Штриховые линии – интервалы доверительной вероятности 95%; квадраты – результаты испытаний / Dashed lines - intervals of confidence level is 95%; squares - the test results

**Рис. 3.** Зависимость вероятности  $p$  самовоспламенения навески дизельного топлива ДВТ объемом 0,3 мл. на поверхности из стали от температуры поверхности  $T_{ii\hat{a}}$   
**Fig. 3.** Dependence of the probability of  $p$  ignition of diesel fuel sample of DWT volume 0.3 ml on the steel surface from the surface temperature  $T_{ii\hat{a}}$

В этом случае уравнение логит-регрессии имеет вид:

$$\delta(\dot{O}_{ii\hat{a}}) = \frac{\exp(-319,887 + 1,217 \cdot \dot{O}_{ii\hat{a}})}{1 + \exp(-319,887 + 1,217 \cdot \dot{O}_{ii\hat{a}})} \quad (13)$$

Для оценки статистической значимости полученного уравнения логистической регрессии (13) была вычислена статистика  $\chi^2$ . Статистика  $\chi^2$  оценивает с помощью критерия Хосмера-Лемешова качество подгонки, сравнивая наблюдаемые частоты и расчётные. В случае хорошего согласия имеем для этой статистики уровень значимости более 5%. Для приведённого выше уравнения (13) статистика  $\chi^2 = 0,57$ . Для числа степеней свободы равном 4, достигаемый уровень значимости  $P\{\chi^2(4) > 0,57\} = 0,97$ , поэтому можно сделать вывод о том, что качество подгонки хорошее.

#### 5. Выводы

В результате исследований разработан новый расчетно-экспериментальный метод, который позволяет предсказывать вероятность наступления самовоспламенения горючей жидкости в том или ином технологическом процессе. На основе предложенного подхода предполагается создание программного кода. Данные исследования позволят произвести категоризацию технологических процессов по их пожароопасности. В качестве критерия безопасности будет служить температура нагретой поверхности ма-

териала, при которой самовоспламенение происходит с определенной степенью вероятности.

## Литература

1. Bennett J.M., *Ignition of Combustible Fluids by Heated Surfaces*, "Process Safety Progress" v. 20, N1, 2001, pp 29-36.
2. Hosmer D.W., Lemeshew S., *Applied Logistic Regression*, N.Y. John Wiley, 2000, 373 P.
3. Volkov E.A., *Chislennyye metody* – М.: Fizmatlit, 2003.

**Луцик А.П.** службу в МВД, органах и подразделениях по чрезвычайным ситуациям проходит с февраля 1994 года, в занимаемой должности – с августа 2011 года.

В период 2002-2003 годах прошел переподготовку в Академии управления при Президенте Республики Беларусь, является экспертом-аудитором по качеству в национальной системе подтверждения соответствия Республики Беларусь. Окончил адъюнктуру Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. Обеспечивает постоянное расширение испытательной базы, области аккредитации испытательного центра, в том числе по европейским нормативным документам, и увеличение количества проводимых испытаний. Имеет более 10 публикаций в научно-технических изданиях. Координирует работу центра в рамках выполнения заданий ГНТП. Область научных интересов – пожарная безопасность зданий, сооружений и объектов.

**Арестович Д.Н.** в 2002 году окончил Белорусский государственный университет по специальности «физика». Службу в органах и подразделениях по чрезвычайным ситуациям проходит с декабря 2002 года, в занимаемой должности – с октября 2013 года. Являлся ответственным исполнителем по заданию 25 «Разработать методику расчетов систем тоннельной вентиляции метрополитена в режиме дымоудаления» ГНТП «Защита от чрезвычайных ситуаций», при реализации которого им проведены научные исследования по оценке эффективности работы тоннельной вентиляции в режиме дымоудаления на действующих и проектируемых линиях Минского метрополитена, создана нормативная база расчетов дымоудаления в метрополитене. Закончил адъюнктуру КИИ МЧС и защитил диссертацию «Оптимизация режима дымоудаления системы тоннельной вентиляции на основе моделирования нестационарных процессов теплопереноса» по специальности 05.26.03 – пожарная и промышленная безопасность. Имеет более 20 публикаций в научно-технических изданиях, является соавтором 4 патентов. Область научных интересов – моделирование процессов теплопереноса.