

УДК 621.515

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВЗАИМОСВЯЗИ  
ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕЙ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ  
ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ**

**THE CORRELATION RESTORATION BETWEEN EXPLOSIVE  
ATMOSPHERE PARAMETERS OF OIL REFINING ENTERPRISE**

**Китаев С.В., Смородова О.В., Кузнецова Е.В.**

**Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
г. Уфа, Российская Федерация**

**S.V. Kitaev, O.V. Smorodova, E.V. Kuznetcova**

**Ufa State Petroleum Technological University,  
Ufa, the Russian Federation**

**e-mail: [olga\\_smorodova@mail.ru](mailto:olga_smorodova@mail.ru)**

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы возникновения аварийной ситуации и моделирования процесса распространения паров бензина в окружающей среде. Решение поставленной задачи реализовано на примере установки гидроочистки бензина Л-24-300 нефтеперерабатывающего завода.

Анализ аварийных инцидентов в сфере нефтепереработки в России и за рубежом показал, что наиболее опасной ситуацией является образование во внешней среде парогазового взрывоопасного облака (90% всех аварий). При расположении технологического оборудования в открытом исполнении последствия пожара или взрыва принимают глобальный характер.

Выполнено ранжирование блоков и непосредственно оборудования по основным показателям – количеству обращающегося опасного вещества, его давлению и температуре. Для вычисления комплексного ранга R по

статистическим данным эксплуатации оборудования нефтепереработки проведена оценка весовых коэффициентов для определения вклада каждого показателя в комплексный ранг. Кроме показателей эксплуатации принята во внимание остаточная стоимость оборудования, которая и определит прямой ущерб в случае пожара или взрыва.

Моделирование рассеивания паров бензина выполнено с помощью программы УПРЗА «Эколог». Карты рассеивания построены для наименее благоприятного летнего периода для 4 вариантов скорости ветра от 0,5 м/с до 10 м/с. С помощью асимптотических преобразований построена трехмерная степенная модель для расчета уровня загрязнения атмосферного воздуха. Показан способ преобразования координат в асимптотические переменные. Моделирование выполнено для расчетов в западном и восточном направлениях с наибольшей плотностью размещения смежных технологических установок производства.

**Abstract.** The paper deals with an emergency and modeling the spread of gasoline vapor in the environment. The solution of the problem is realized on the example of gasoline hydrotreating unit L-24-300 refinery.

Analysis of emergency incidents in the field of oil refining in Russia and abroad showed that the most dangerous situation is the formation of explosive cloud (90% of all accidents). The consequences of fire or explosion at the location of technological equipment in the outdoor performance are of the global character.

The units and equipment are ranged on the main indicators - the number of accesses of the dangerous substance, its pressure and temperature. To calculate the complex rank R according to the statistics of operation of oil refining equipment weight factors to determine the contribution of each indicator into an integrated rank were assessed. Besides operating indicators the residual value of the equipment, which will determine the direct damage in the event of fire or explosion, was taken into account.

Modelling of gasoline vapors dispersion was accomplished by UPRZA "Ecolog" program. The dissipate maps are built for the least favorable summer conditions for 4 wind speed variants: of 0,5 m / s to 10 m / s. A three-dimensional model for calculating a level of air pollution was built with the help of asymptotic transformations. A method of coordinate transformation into the asymptotic variable is shown. Simulation performed for settlements in the western and eastern areas with the highest-density related technological production plants.

**Ключевые слова:** технологическая установка, пары бензина, математическое моделирование, промышленная безопасность, ранжирование.

**Key words:** process installation, gasoline vapor, mathematical simulation, industrial security, ranging.

На территории России находится более ста тысяч экологически опасных объектов, сотни тысяч километров нефтегазовых трубопроводов. Год от года наблюдается рост числа людей, работающих в загрязнённой атмосфере, растёт насыщенность территории России промышленными объектами, использующими токсичные, горючие и взрывоопасные вещества [1].

В технологических процессах, связанных с добычей, транспортировкой, переработкой, хранением и применением горючих газов и легковоспламеняющихся жидкостей, всегда имеется опасность образования взрывоопасных газо- и паровоздушных смесей [2]. Причинами взрывов наиболее часто является утечка газов в соединениях, перегрев аппаратов, чрезмерное повышение давления, разрыв или поломка деталей оборудования. Поэтому задача предупреждения и предотвращения опасных ситуаций для персонала, населения и окружающей природной

среды, связанных с наличием горючих газов в атмосфере, является актуальной и своевременной [3].

Крупные аварии на нефтеперерабатывающих производствах в большинстве случаев происходят из-за образования источника утечки жидкости или углеводородного пара (рисунок 1).

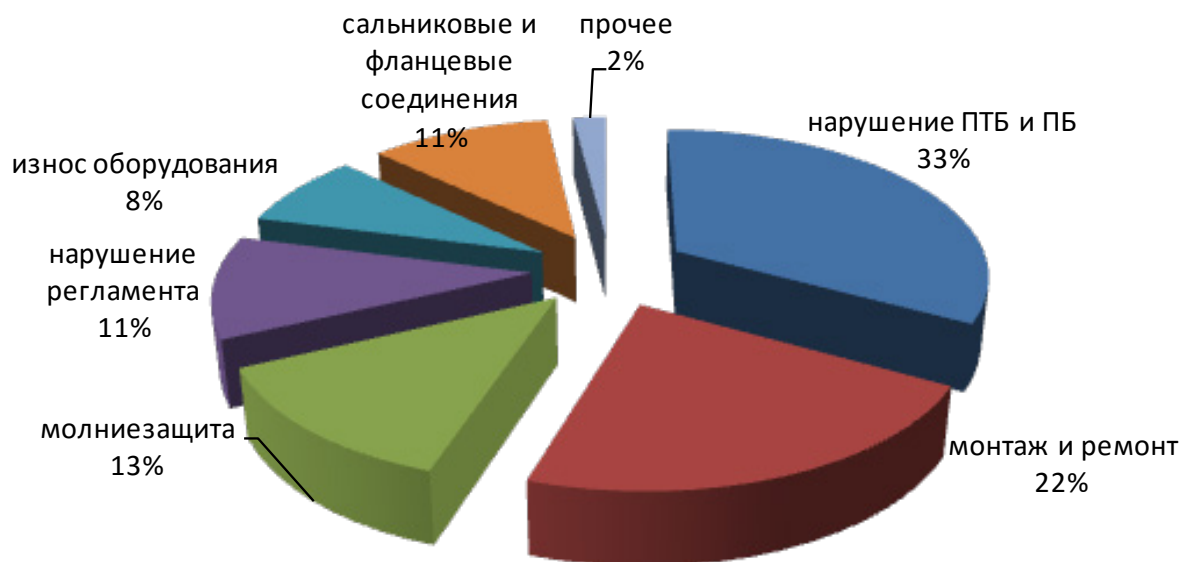


Рисунок 1. Структура аварий по причинам

Анализ последствий опасных событий показал, что аварии на открытых площадках наиболее масштабны вследствие разветвленности сети технологических коммуникаций, большой плотности насыщения территории производства опасными веществами в оборудовании установок.

Одной из наиболее опасных ситуаций на предприятиях нефтепереработки в России и за рубежом (более 90% всех инцидентов) является образование облака газопаровоздушных смесей [4]. Задача моделирования загрязнения окружающей среды в случае разгерметизации оборудования или трубопроводов в статье решается на примере установки гидроочистки бензина Л-24-300.

В состав установки входит три основных блока - сырьевой, реакторный и блок стабилизации. В оборудовании и технологических трубопроводах блоков обращаются опасные вещества общим количеством

около 125 т (бензин; углеводородный и водородсодержащий газ; нестабильный гидрогенизат; рефлюкс). Основное количество составляет бензин (более 70 т).

В качестве критериев для ранжирования блоков и оборудования установки по опасности рассмотрены количество опасного вещества, его давление и температура. Именно эти параметры оказывают основное влияние на масштабы аварии и ее экономические последствия. Выявление максимально опасных узлов в технологическом процессе было реализовано ранжированием оборудования установки (всего 35 единиц): емкости, печи, реакторы, колонны, теплообменники, холодильники (таблица 1).

Таблица 1. Технологическое оборудование установки гидроочистки бензина

Наименование оборудования	Сырьевой блок	Реакторный блок	Блок стабилизации
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Емкость	1		
Теплообменник		8	6
Трубчатая печь		2	
Реактор		2	
АВО		1	
Сепаратор		2	2
Холодильник		3	5
Подогреватель			2
Стабилизационная колонна			1
Итого	1	18	16

Для оценки энергоемкости оборудования каждого вида было выполнено сравнение их единичной вместимости и технологических параметров. Наибольшей вместимостью обладает емкость сырья (более 50 т бензина), максимальное давление – в сепараторе водородсодержащего газа - достигает 6,3 МПа, наибольшая температура – 360 °С – в трубчатой печи и в реакторе.

Для оценки опасности оборудования по совокупности показателей был определен комплексный ранг, учитывающий одновременно и количество обращающегося вещества в единице оборудования и эксплуатационные параметры – давление и температуру [5]:

$$R = R_1 \times g_1 + R_2 \times g_2 + R_3 \times g_3,$$

где  $R_1$  – частный ранг оборудования по количеству опасного вещества;

$R_2$  – частный ранг оборудования по давлению опасного вещества;

$R_3$  – частный ранг оборудования по температуре опасного вещества;

$g_1 \div g_3$  – весовые коэффициенты частных рангов по количеству, давлению и температуре опасного вещества соответственно; приняты на основе статистических данных эксплуатации оборудования нефтепереработки.

Значение комплексного ранга  $R$  может изменяться в диапазоне от 0 до 1. Величина  $R = 1$  соответствует максимально опасному оборудованию со всех точек зрения – и по количеству, и по давлению, и по температуре опасного вещества. Наиболее опасным источником установки гидроочистки бензина определена сырьевая емкость, как самая вместимая по количеству опасного вещества –  $50 \text{ м}^3$ , а значит, пожар или взрыв ее приведет к наиболее масштабным последствиям для предприятия (рисунок 2).

Кроме технологических параметров, на идентификацию оборудования, приводящего к максимальному ущербу, оказывает влияние остаточная стоимость (рисунок 3). Именно по ее величине будет определяться прямой ущерб предприятию в случае наступления аварийной ситуации.

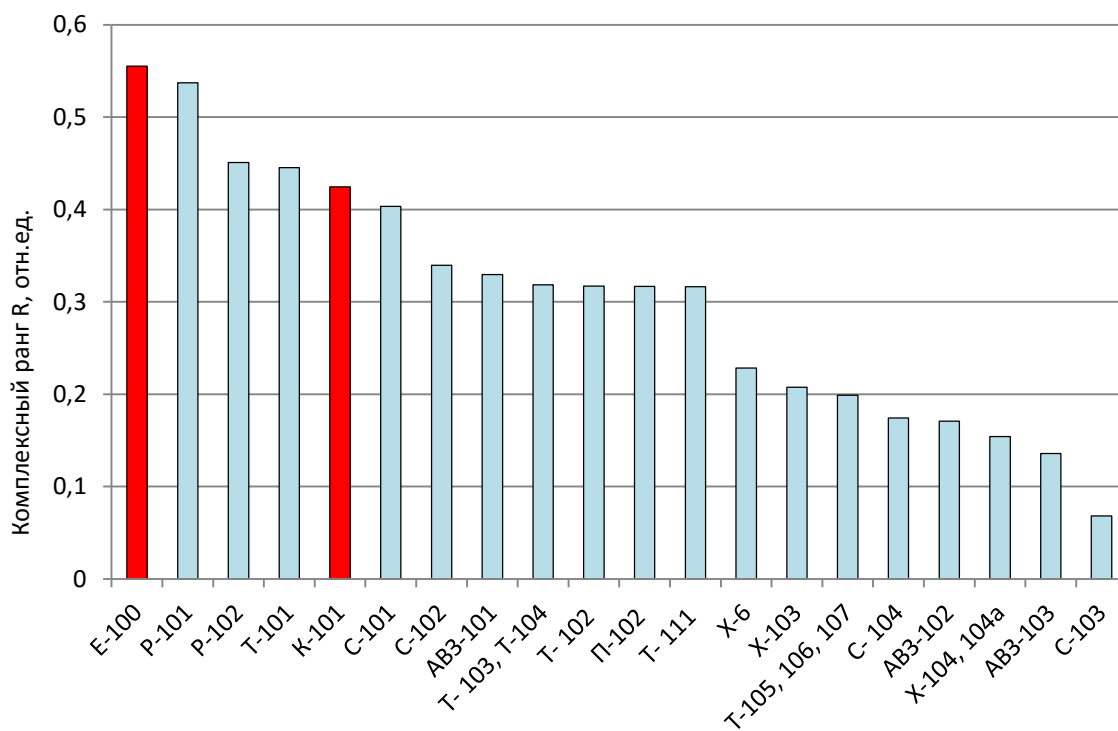


Рисунок 2. Ранжирование технологического оборудования по комплексному рангу R

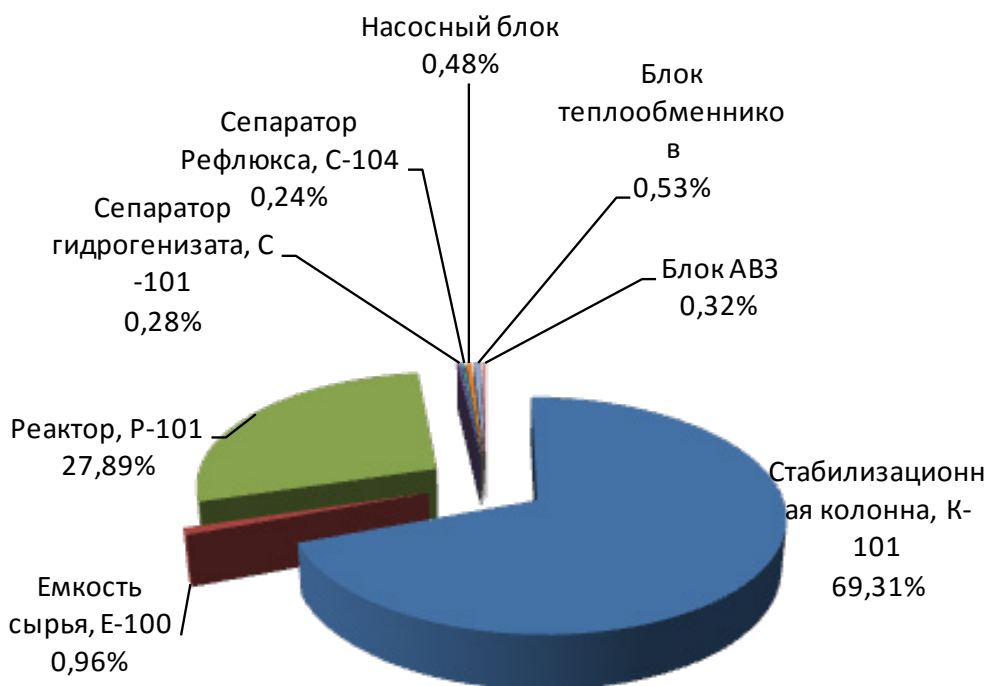


Рисунок 3. Структура остаточной стоимости оборудования установки гидроочистки бензина

Структура стоимости показала, что почти 70% остатка материальных фондов приходится на стабилизационную колонну К-101, и именно ее

разрушение в случае аварии обусловит максимальные убытки предприятия.

Для определения степени загрязнения окружающей среды в качестве источников загрязнения определены емкость сырьевого бензина – Е-100 – и стабилизационная колонна К-101. В качестве аварийной ситуации рассматривается разгерметизация подводящего трубопровода в месте врезки в аппарат [6], загрязняющего вещества - пары бензина нефтяного малосернистого в пересчете на углерод (код загрязняющего вещества 2704). Расчеты по определению уровня загрязнения по величине относительного ПДК выполнены для наиболее сложной и опасной ситуации – одновременном действии обоих источников [7].

На территории установки Л-24-300 расположены два объекта, в помещениях которых находится обслуживающий персонал. Это насосная перекачки рефлюкса – насосная 1, и насосная перекачки сырьевого бензина – насосная 2 (таблица 2).

Таблица 2. Сведения о расчетных точках контроля загрязнения воздуха

№	Координаты точки (м)		Высота (м)	Тип точки	Комментарий
	X	Y			
1	40,00	70,00	2	точка пользователя	насосная сырьевого бензина 1
2	195,00	158,00	2	точка пользователя	насосная рефлюкса 2

Размер расчетной площадки выбран 1000 м, шаг сетки – 40 м. Начало местной системы координат привязано к крайнему юго-восточному углу территории установки (таблица 3).

Таблица 3. Координаты площадки установки Л-24-300

Координаты середины 1-й стороны (м)		Координаты середины 2-й стороны (м)		Ширина, (м)	Шаг, (м)		Высота, (м)
X	Y	X	Y		X	Y	
400	-300	-300	400	1000	40	40	2



В соответствии с давлением в источниках была определена интенсивность утечки паров бензина в атмосферный воздух – 12,64 г/с из емкости Е-100 и 15,96 г/с из колонны К-101.

Моделирование процесса рассеивания паров бензина выполнено с помощью программы УПРЗА ЭКОЛОГ, версия 3.00 фирмы "ИНТЕГРАЛ". Программа реализует положения «Методики расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86)» (рисунок 4).

Расчеты на летние климатические условия показали, что доля ПДК бензина при разгерметизации фланцевых соединений подводящих трубопроводов емкости Е-100 и стабилизационной колонны К-101 составят для насосной 1 и насосной 2  $K = 1,66$  и  $K = 1,86$  соответственно [8].

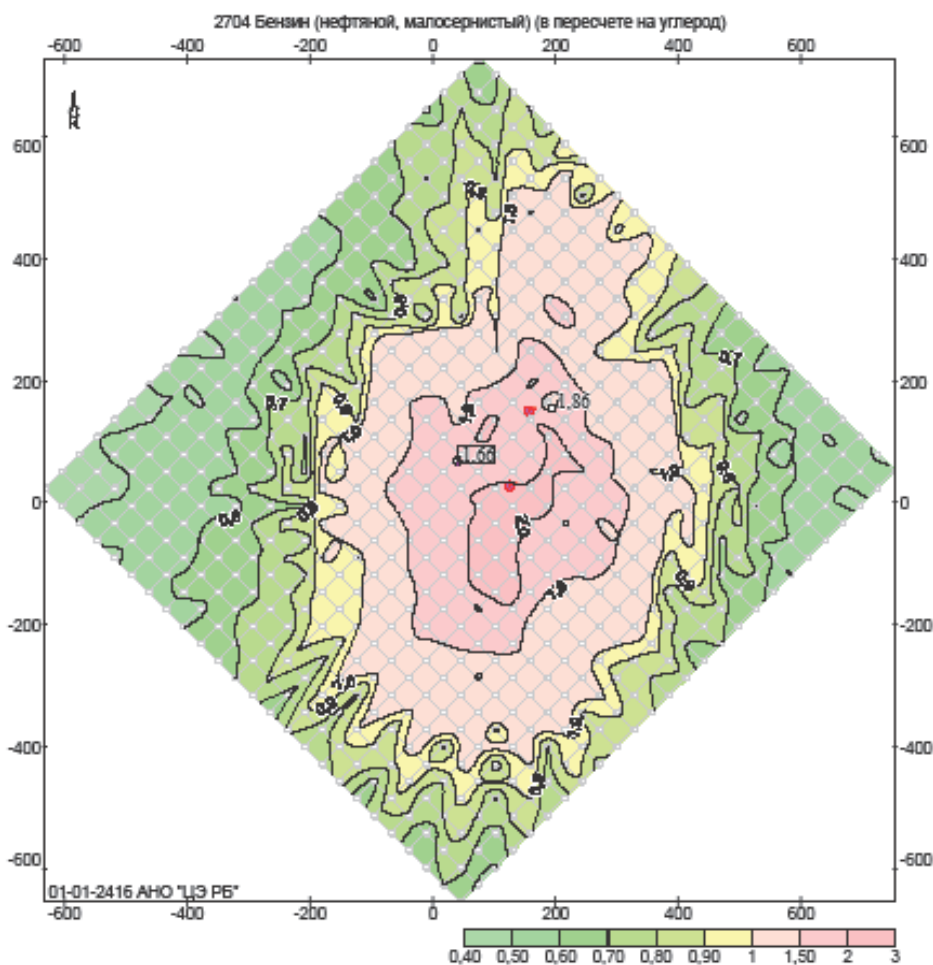


Рисунок 4. Поля концентрации паров бензина

Для построения математической модели загрязнения окружающего внешнего пространства парами бензина карты рассеивания были построены для летнего времени года при скоростях ветра 0,5 м/с, 2,5 м/с, 5,0 м/с и 10 м/с (таблица 4, рисунок 5).

Таблица 4. Результаты моделирования процесса рассеивания паров бензина, доли ПДК

Расстояние от источников, м	Скорость ветра, м/с			
	5 м/с	0,5 м/с	10 м/с	2,5 м/с
100	1,80	3,00	1,20	2,30
160	1,45	2,30	0,98	1,75
190	1,30	2,00	0,90	1,55
280	0,95	1,30	0,70	1,05
340	0,75	1,00	0,60	0,85

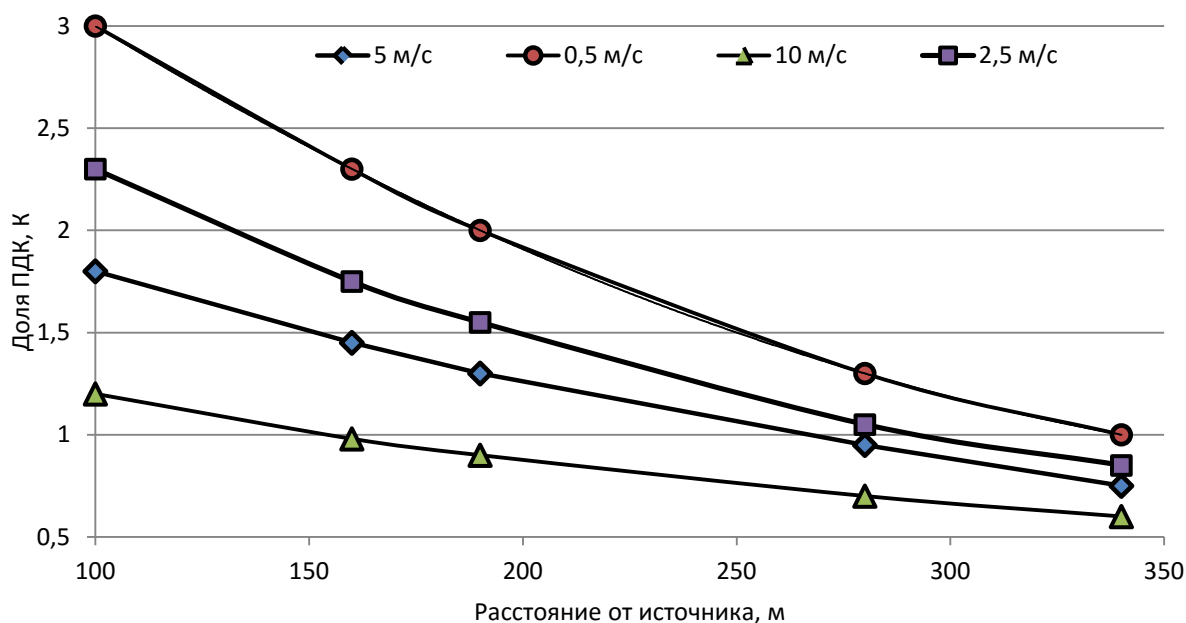


Рисунок 5. Зависимость долей ПДК от расстояния от источников с учетом скорости ветра

Результаты моделирования показали, что концентрация паров бензина является функцией двух аргументов - расстояния от источника выбросов и скорости ветра. Актуальной представляется задача разработки аналитической универсальной зависимости определения долей ПДК при разных скоростях ветра в области повышенной загазованности парами

бензина. Эта задача эффективно может быть решена при использовании специальной замены переменных [9]. Координатная система для этого решения носит название асимптотической благодаря соответствующему поведению модельной функции на бесконечности. Алгоритм преобразований следующий.

Рассмотрим модельную функцию

$$f = \frac{(K - K_{\infty})}{(K_0 - K_{\infty})},$$

где  $K_0 = K(w)$  при  $L=L_{min} = 100$  м,  $K_{\infty} = K(w)$  при  $L=L_{max} = 340$  м - вспомогательные функции, для которых  $L_{min}$  и  $L_{max}$  выбраны из реальных условий рассеивания паров бензина до доли ПДК  $K = 1$  (рисунок 4).

В соответствии с требованиями [9], исходные данные для возможности приведения к асимптотическим переменным, были преобразованы (рисунок 6):

- аргумент  $X_1=340-L$ ;
- функция  $K_1=1/K$ .

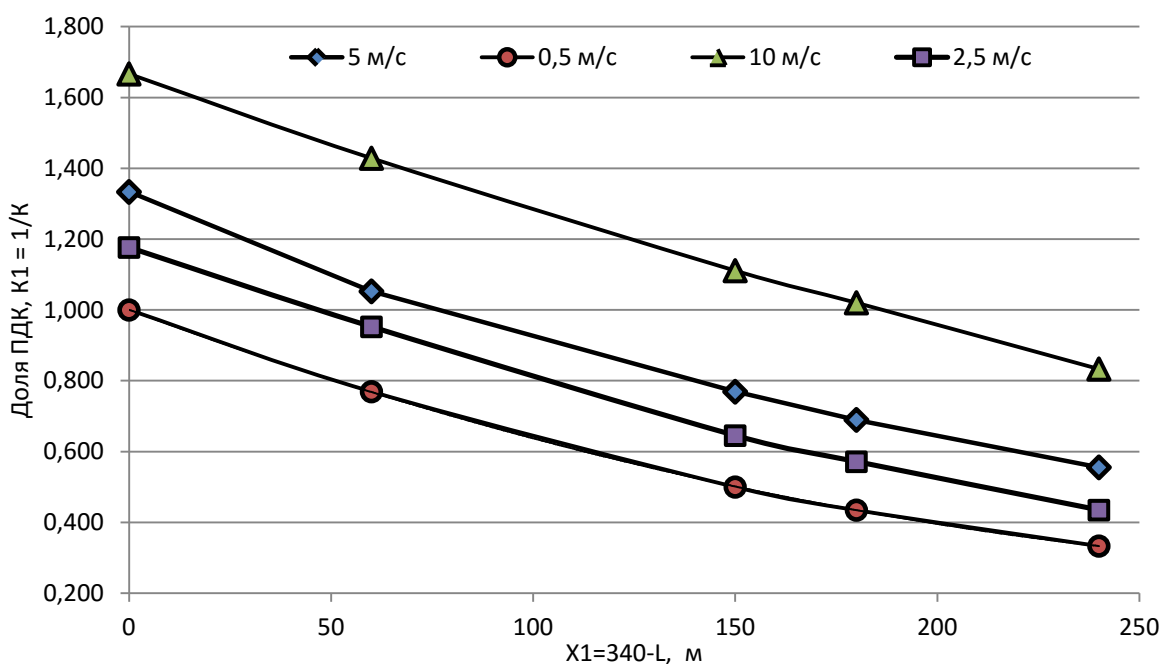


Рисунок 6. Исходные данные после преобразования переменных

Данные преобразованного вида уже могут быть обработаны предложенным методом. Аналитические выражения степенного вида для вспомогательных функций  $K_{10}$  и  $K_{1\infty}$  (рисунок 7) были определены стандартным методом наименьших квадратов.

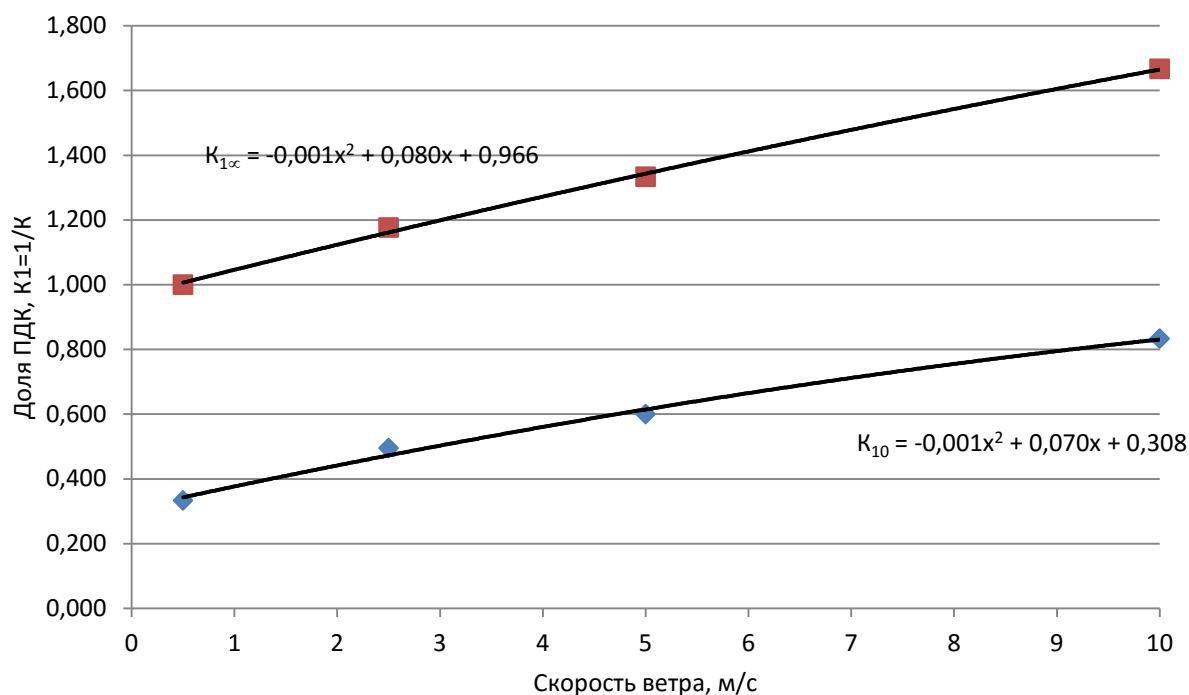


Рисунок 7. Вспомогательные функции  $K_{10}$  и  $K_{1\infty}$

Основным достоинством модельной функция  $f$  является то, что при любых значениях скорости ветра  $f = 0$  при  $X_1 = X_{1\min}$ , и  $f = 1$  при  $X_1 = X_{1\max}$ .

Для построения аналитического выражения функции  $f$  было определено ее значение в ряде точек при значениях переменной расстояния  $X_1$  от 0 м до 250 м (рисунок 8). Видно, что точки четырех серий значений функции  $f$  — для всех значений скорости ветра  $w$  — в плоскости  $(X_1, f)$  ложатся на одну кривую, а значит, определяются одной зависимостью.

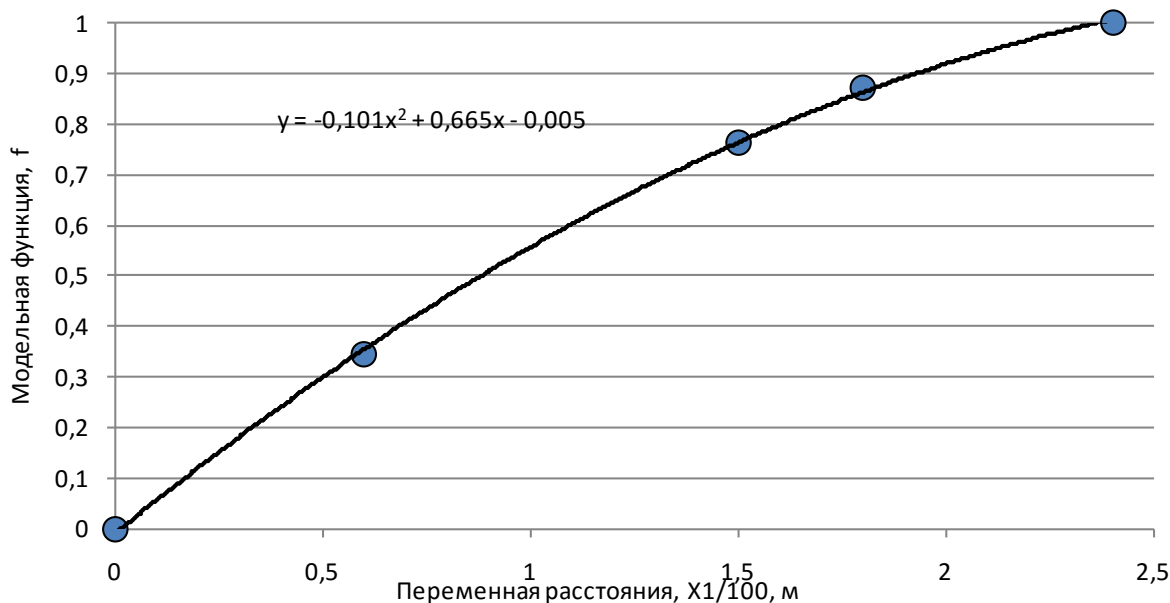


Рисунок 8. Модельная функция, f

Математическая модель функции  $f$  получена методом наименьших квадратов. Дисперсия адекватности модели составляет величину более 99%.

С учетом полученного аналитического выражения для модельной функции  $f$  была идентифицирована зависимость доли ПДК =  $K$  от скорости ветра  $w$  и расстояния от источника выбросов паров бензинов  $L$ :

$$K(L, w) = [0,308 + 0,07w - 0,001w^2 + (340 - L) \times (0,069L - 22,85) \times (0,658 + 0,01w)]^{-1},$$

где  $L$ , м – расстояние от источника выбросов;

$w$ , м/с – скорость ветра.

## Выводы

1. В составе установки Л-24-300 идентифицировано технологическое оборудование, приводящее к наиболее масштабному технико-экономическому ущербу в случае аварийного пожара или взрыва.

2. Построены карты рассеивания при утечке паров бензина от разгерметизации фланцевых соединений трубопроводов с сырьевым резервуаром и стабилизационной колонной.

3. В асимптотических координатах разработана математическая модель для расчета концентрации паров бензина в диапазоне 0 ÷ 340 м и при скорости ветра 0,5 ÷ 10 м/с. Погрешность модели не превышает 1,0 %.

### Список используемых источников

1 Киреев И.Р., Николаева И.А., Абдрахманов Н.Х. Определение загазованности на объектах нефтегазовой промышленности при помощи газоанализатора // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. 2016. №1(7). С. 67-68.

2 Киреев И.Р., Закирова З.А., Латыпова Э.А. Методы устранения опасности возникновения взрывов и пожаров на ООО РН-Юганскнефтегаз//Безопасность жизнедеятельности. 2015. №10(178). С. 37-39.

3 Смородова О.В., Китаев С.В., Сергеева К.В. Повышение взрывопожарной безопасности применением огнепреградителей насадочного типа// Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн./УГНТУ. 2016. №5. С.193-206.

4 Шавалеев Д.А., Абдрахманов Н.Х. Управление промышленной безопасностью объектов топливно-энергетического комплекса на основе анализа и мониторинга рисков// Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн./УГНТУ. 2012. №6. С.435-441.

5 Смородова О.В., Хафизов Р.В. Способ ранжирования газоаналитических систем//Символ науки. 2016. № 8-2. С. 84-88.

6 Федосов А.В., Журавлева Е.В. Моделирование воздушных потоков на нефтеперевалочном комплексе с целью определения оптимального расположения зданий и сооружений // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн./УГНТУ. 2014. №2. С.260-277.

7 Хаматдинова А.В., Смородова О.В. Компьютерное моделирование поведения воздушных масс как инструмент обеспечения безопасности предприятий//Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2016. №3. С.100-110.

8 Хаматдинова А.В., Смородова О.В. Приборный контроль состояния газовой среды на предприятиях нефтепереработки// Технологии техносферной безопасности. 2015. № 4 (62). С. 325-331.

9 Байков И.Р., Жданова Т.Г., Гареев Э.А. Моделирование технологических процессов трубопроводного транспорта нефти и газа. Уфа:УНИ, 1994. 128 с.

### References

1 Kireev I.R., Nikolaeva I.A., Abdrahmanov N.H. Opredelenie zagazovannosti na ob'ektah neftegazovoi promishlennosti pri pomochsi gazoanalizatora//Ekspertiza promishlennoi bezopasnosti I diagnostika opasnih proizvodstvennih ob'ektov. 2016. №1(7). S.67 – 68. [in Russian].

2 Kireev I.R., Zakirova Z.A., Latipova E.A. Metodi ustraneniya opasnosti vzniknoveniya vzrивov I pojarov na OOO RN-Uganskneftegas//Bezopasnost jiznedeyatel'nosti. 2015. №10(178). S.37-39. [in Russian].

3 Smorodova O.V., Kitaev S.V., Sergeeva K.V. Povishenie vzrивopojarnoi bezopasnosti primeneniem ognepregraditelei nasadochnogo tipa// Neftegazovoe delo: electron.nauch.jurn./UGNTU, 2016. №5. S.193-206. [in Russian].

4 Shavaleev D.A., Abdrahmanov N.H. Upravlenie promishlennoi bezopasnost' u ob'ektov toplivno-energeticheskogo kompleksa na osnove analiza I monitoringa riskov// Neftegazovoe delo: electron.nauch.jurn./UGNTU, 2012. №6. S.435-441. [in Russian].

5 Smorodova O.V., Hafizov R.V. Sposob ranjirovaniya gazoanaliticheskikh system// Simvol nauki. 2016. №8-2. S.84 – 88. [in Russian].

6 Fedosov A.V., Juravleva E.V. Modelirovanie vozdushnih potokov na nefteperevalochnom komplekse s cel'yu opredeleniya optimalnogo raspolozheniya zdaniy I sooruzhenii// Neftegazovoe delo: electron.nauch.jurn./UGNTU, 2014. №2. S.260-277. [in Russian].

7 Hamatdinova A.V., Smorodova O.V. Komp'yuternoe modelirovanie povedeniya vozdushnih mass kak instrument obespecheniya bezopasnosti predpriyatii//Problemi bezopasnosti I chrezvichainih situacii. 2016. №3. S.100-110. [in Russian].

8 Hamatdinova A.V., Smorodova O.V. Pribornii control sostoyaniya gazovozdushnoi sredi na predpriyatiyah neftepererabotki//Tehnologii tehnosfernoi bezopasnosti. 2015. №4(62). S.325 – 331. [in Russian].

9 Baikov I.R., Jdanova T.G., Gareev E.A. Modelirovanie tehnologicheskikh processov truboprovodnogo transporta nefiti i gaza//Ufa:UNI. 1994. 128 S. [in Russian].

### **Сведения об авторах**

#### **About the authors**

Китаев С.В., д-р техн. наук, профессор кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа», ФГБОУ ВО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

S.V. Kitaev, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair «Transport and Storage of Oil and Gas», FSBEI HE USPTU, Ufa, the Russian Federation

Смородова О.В., канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика», ФГБОУ ВО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

O.V. Smorodova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair «Industrial Heat Powering», FSBEI HE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: olga\_smorodova@mail.ru



Кузнецова Е.В., канд. техн. наук, доцент кафедры «Экономики и управления на предприятии нефтяной и газовой промышленности», ФГБОУ ВО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

E.V. Kuznetcova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair « Economics and management at the enterprise of the oil and gas industry», FSBEI HE USPTU, Ufa, the Russian Federation