



ОМЕЛЬЧУК МИХАИЛ ВЛАДИМИРОВИЧ

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ  
БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ХРАНЕНИЯ  
ЛЕГКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЯХ**

Специальность 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность  
(нефтегазовая отрасль)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Техносферная безопасность» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский индустриальный университет».

**Научный руководитель**

доктор технических наук, доцент  
**Пермяков Владимир Николаевич**

**Официальные оппоненты:**

**Барбин Николай Михайлович**  
почетный работник науки и техники РФ,  
доктор технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Уральский ГАУ» / институт  
физических и химических проблем и  
техносферной безопасности, директор

**Плотникова Галина Викторовна**  
кандидат химических наук, доцент  
ФГКОУ ВО «Восточно-Сибирский  
институт Министерства внутренних дел  
Российской Федерации» / кафедра  
пожарно-технической экспертизы, доцент

**Ведущая организация**

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Воронежский  
государственный технический  
университет» (г. Воронеж)

Защита диссертации состоится « 4 » июля 2017 года в 11:00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте [www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).

Автореферат диссертации разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Абуталипова Елена Мидхатовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Решение проблемы обеспечения безопасности взрывопожароопасных объектов тесно связано с применением численного моделирования, что находит свое отражение в таких нормативно-правовых документах, как «Методика оценки последствий аварий на взрывопожароопасных химических производствах» и «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ», утвержденных приказами Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20 апреля 2015 г. № 160 и № 158 соответственно. Вопросы моделирования аварийных процессов рассмотрены в работах таких отечественных и зарубежных ученых, как Белов П. Г., Бесчастнов М. В., Гельфанд Б. Е., Гражданкин А. И., Едигаров А. С., Козлитин А. М., Котляревский В. А., Кузеев И. Р., Кулешов А. А., Кутушев А. Г., Ларионов В. И., Лепихин А. М., Лисанов М. В., Махутов Н. А., Москвичев В. В., Одишария Г. Э., Пермяков В. Н., Поникаров С. И., Прусенко Б. Е., Сафонов В. С., Тляшева Р. Р., Bakke J. R., Bjerketvedt D., Colenbrander G., Marshall V. C., Patankar S., Puttock J., Van Wingerden K. и ряда других крупных специалистов.

Одной из задач, решаемых путем численного моделирования, является поиск вероятных зон застоя (участков, где скорость воздушного потока (ветра) не превышает 0,5 м/с) на территории опасных производственных объектов (ОПО). Варианты решения этой задачи представлены в трудах ученых Тляшевой Р. Р., Солодовникова А. В., Красногорской Н. Н., Ахмерова В. В., которые использовали метод прогнозирования вероятных зон застоя с применением системы трехмерного моделирования. Подобные исследования представляют особую значимость для объектов, на которых присутствуют легкие углеводороды (С3-С6), что объясняется физико-химическими свойствами последних. Уменьшение размеров зон застоя позволяет существенно снизить объем облака топливо-воздушной смеси и, как следствие, уменьшить взрывопожароопасность объекта.

### Степень разработанности

В специальной литературе существуют научные исследования по детальному изучению зон застоя для территорий нефтеперерабатывающих

предприятий и автозаправочных станций, на которых возможен выход легких углеводородов. Однако отсутствуют аналогичные исследования для площадок резервуарных парков на территории газонаполнительных станций и газоперерабатывающих заводов, в то время как объекты хранения легких углеводородов представляют большую опасность, прежде всего вследствие концентрации на ограниченной территории больших объемов взрывопожароопасных веществ.

В действующих нормативно-правовых актах на этапе проектирования, идентификации опасностей и поиска оптимальных вариантов расположения производственной площадки, размещения технологических объектов, компоновки установок и оборудования отсутствует методика комплексной оценки вероятных зон застоя с применением систем трехмерного моделирования, позволяющая подобрать наиболее эффективное решение по обеспечению безопасности объектов хранения легких углеводородов.

В существующих исследованиях численного моделирования зон застоя недостаточно лабораторных и промышленных экспериментов, подтверждающих адекватность получаемых числовых результатов.

### **Цель работы**

Обеспечение промышленной и пожарной безопасности объектов хранения легких углеводородов путем прогнозирования вероятных зон застоя воздушных потоков.

**Объект исследования** – площадки резервуарных парков с легкими углеводородами предприятий нефтегазовой отрасли. Объекты хранения метана и этана в работе не рассматривались.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи**:

1 Анализ существующих расчетно-экспериментальных данных по исследованию интенсивности испарения легких углеводородов с земной поверхности.

2 Расчет образования вероятных зон застоя при различных объемно-планировочных решениях путем использования системы трехмерного моделирования и метода конечных объемов.

3 Верификация результатов численного исследования движения воздушных потоков на лабораторном стенде и на площадке газонаполнительной станции.

4 Разработка методики оценки безопасности объектов хранения легких углеводородов в нештатных ситуациях, которая основывается на анализе вероятных зон застоя путем применения систем трехмерного моделирования.

### **Научная новизна**

1 Предложена функциональная зависимость массы испарившихся легких углеводородов от времени, позволяющая проводить оперативный расчет интенсивности испарения легких углеводородов при сохранении высокой достоверности получаемых результатов (отклонение от реальных значений в пределах 11 %).

2 Установлено, что путем применения разработанного параметра оценки состояния безопасности объекта хранения легких углеводородов и внесения объемно-планировочных и организационно-технических изменений можно добиться повышения уровня безопасности не менее, чем в 2,8 раза.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании методики оценки безопасности объектов хранения легких углеводородов. Применение методики позволяет повысить безопасность указанных объектов.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанная методика оценки безопасности объектов хранения легких углеводородов используется в учебном процессе ТИУ при подготовке студентов, обучающихся по направлению 20.03.01 «Техносферная безопасность» профиль «Безопасность технологических процессов и производств», в рамках освоения дисциплины «Производственная безопасность».

Также указанную методику оценки безопасности объектов хранения легких углеводородов рекомендуется использовать при разработке деклараций промышленной безопасности и обоснований безопасности ОПО.

## **Методы исследований**

Для решения поставленных задач использованы методы: численного моделирования; конечных объемов; экспертных оценок; теории подобия; лабораторного исследования.

## **Положения, выносимые на защиту**

1 Установленная и адаптированная к определенным граничным условиям функциональная зависимость массы испарившихся легких углеводородов от времени.

2 Предложенный параметр оценки состояния безопасности объекта хранения легких углеводородов (сравнительный критерий), который позволяет производить расчет оптимального расположения сооружений и их конструктивных изменений.

3 Разработанная методика оценки безопасности объектов хранения легких углеводородов и алгоритм к ней, позволяющие проводить комплексную оценку зон застоя с применением систем трехмерного моделирования и подбирать наиболее результативное решение по обеспечению безопасности. Подтверждение их достоверности проведенными численными, лабораторными и натурными экспериментами. Результаты апробации методики и алгоритма для объекта моделирования (газонаполнительная станция).

## **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Рассматриваемая область исследования, связанная с проблемой безопасности объектов хранения легких углеводородов, соответствует паспорту специальности 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность», а именно: п. 3 «Научное обоснование принципов и способов обеспечения промышленной и пожарной безопасности на предприятиях промышленности, строительства и на транспорте», п.6 «Исследование и разработка средств и методов, обеспечивающих снижение пожарной и промышленной опасности технологических процессов, предупреждения пожаров и аварий, тушения пожаров».

## **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность результатов работы обеспечена использованием современных

средств математического моделирования и удовлетворительным согласованием расчетных результатов с экспериментальными данными.

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на Всероссийской научно-практической конференции «Новые технологии – нефтегазовому региону» (г. Тюмень, 2013- 2015 г.); Международной научно-технической конференции «Нефть и газ Западной Сибири» (г. Тюмень, 2013, 2015 г.); Международном симпозиуме имени академика М. А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2013 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна (опыт, инновации)» (г. Тюмень, 2012, 2014 г.); Международной научно-практической конференции «Проблемы обеспечения безопасности жизнедеятельности муниципальных образований: пути решения» (г. Москва, 2013 г.); Международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники» (г. Уфа, 2013, 2015 г.); Международной научно-практической конференции «Опыт ликвидации крупномасштабных чрезвычайных ситуаций в России и за рубежом» (г. Москва, 2014 г.); Всероссийской конференции «Безопасность и живучесть технических систем» (г. Красноярск, 2015 г.); научных семинарах кафедры «Техносферная безопасность» ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет».

### **Публикации**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 12 основных научных работах, в том числе 9 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и приложений, изложена на 177 страницах машинописного текста, содержит 63 рисунка и 19 таблиц. Список литературы включает 182 наименования.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, формулируются цель и задачи исследования, отмечаются научная новизна и

практическая значимость работы.

**В первой главе** диссертационной работы изучена специфика легких углеводородов (С3-С6), содержащихся в сжиженном углеводородном газе (СУГ) и широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ). Указанные вещества при разгерметизации могут скапливаться в вероятных застойных зонах. За счет реализации мероприятий, направленных на уменьшение размеров зон застоя, можно влиять на безопасность объектов хранения легких углеводородов в нештатных ситуациях.

Проведен анализ исследований по теме работы. На основании обзорного материала делается вывод о необходимости разработки методики оценки безопасности объектов хранения легких углеводородов, которые основываются на комплексном анализе вероятных зон застоя путем применения систем трехмерного моделирования.

**Во второй главе** проведена аналитическая обработка существующих расчетно-экспериментальных данных по исследованию интенсивности испарения пропана и ШФЛУ с земной поверхности. Определено значение доли мгновенно испарившейся массы этих веществ при внезапном проливе на грунт, которое для рассмотренных условий составляет от 1,1 до 39,2 % исходной массы и зависит от условий хранения и температуры окружающей среды. Оставшаяся часть горючего испаряется за длительный промежуток времени (рисунок 1).

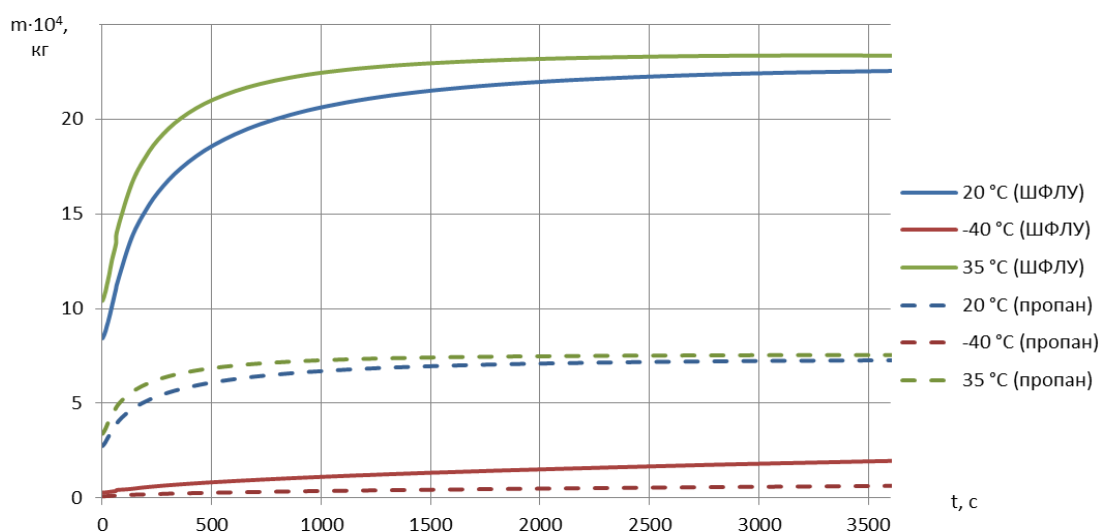


Рисунок 1 – Изменение массы испарившегося сжиженного газа во времени (начальная масса пропана  $m_0=86320$  кг; начальная масса ШФЛУ  $m_0=264960$  кг; температура хранения равна температуре окружающей среды)



В результате анализа полученных данных предложена функциональная зависимость (1), отражающая динамику испарения легких углеводородов с поверхности в течение первого часа с момента пролива.

$$m(t) = m_0 \cdot \left( a_0 + a_1 \cdot \left( \frac{\Delta t}{t_k} \right)^{-0.01} + a_2 \cdot e^{-\frac{\Delta t}{t_k}} \right), \quad (1)$$

где  $m(t)$  – масса вещества, испарившегося с начала разлива до момента времени  $t$ , кг;  $m_0$  – начальная масса вещества, кг;  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  – расчетные коэффициенты;  $\Delta t$  – время, прошедшее с момента пролива, с;  $t_k$  – время, прошедшее с момента пролива до границы применимости функциональной зависимости, с ( $t_k = 3600$ ).

Определены расчетные коэффициенты, значения которых представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения расчетных коэффициентов для определения массы испарившегося сжиженного газа с поверхности

Условия применения				Расчетные коэффициенты		
Вещество	Температура, °С		Толщина слоя разлившегося вещества (h), м	$a_0$	$a_1$	$a_2$
	хранения ( $T_{xp}$ )	окружающей среды ( $T_{окр}$ )				
ШФЛУ	-8	20	0,05	6,869	-5,697	-0,61
ШФЛУ	-8	20	0,20	0,881	-0,489	-0,178
ШФЛУ	20	20	0,05	6,456	-5,324	-0,451
ШФЛУ	35	35	0,05	7,23	-6,157	-0,256
ШФЛУ	-40	-40	0,05	0,255	-0,145	-0,089
Пропан	20	20	0,05	6,871	-5,806	-0,344
Пропан	35	35	0,05	7,519	-6,504	-0,166
Пропан	-40	-40	0,05	0,284	-0,174	-0,087

Для функциональной зависимости (1) с различными расчетными коэффициентами построены регрессионные функции. Коэффициенты детерминации составляют от 0,924 до 0,996, что свидетельствует о хорошем согласовании результатов моделирования.

Подставляя различные значения масс (86320 кг жидкого пропана и 264960 кг жидкой ШФЛУ), получаем аналогичные зависимости. Коэффициенты детерминации составляют 0,905, 0,894, 0,969, что свидетельствует о возможности применения полученной функциональной зависимости при моделировании испарения различных масс легких углеводородов. Из приведенных данных видно, что масса вещества не оказывает значительного влияния на результаты расчета количества испарившегося сжиженного газа.

Таким образом, предложенная функциональная зависимость может быть использована для нахождения количества испарившихся легких углеводородов с глинисто-песчаного грунта для следующих начальных условий:

- 1)  $T_{\text{хр}} = T_{\text{окр}} = 20; 35; \text{минус } 40 \text{ } ^\circ\text{C}; h = 0,05 \text{ м};$
- 2)  $T_{\text{хр}} = \text{минус } 8 \text{ } ^\circ\text{C}; T_{\text{окр}} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}; h = 0,05; 0,2 \text{ м}.$

Предложенная функциональная зависимость массы испарившихся легких углеводородов от времени может быть применена на этапах оценки опасности объектов хранения легких углеводородов. Ее преимуществами являются:

- оперативность расчета при сохранении высокой достоверности получаемых результатов (отклонение от реальных значений в пределах 11 %);
- возможность использования ее для проведения расчетов в программных комплексах в области вычислительной гидродинамики, в которых отсутствует возможность моделирования процессов парообразования.

**В третьей главе** выбран объект моделирования – газонаполнительная станция (ГНС). Моделирование осуществлялось путем использования метода конечных объемов, реализованного в программном комплексе FlowVision.

Исходя из физико-химических свойств легких углеводородов и климатических особенностей региона расположения ГНС, зоны застоя определялись на высоте 0,2; 0,5; 1,5 м при скорости ветра 1; 2; 3 м/с. Данные о повторяемости направлений и скорости ветра взяты для летнего периода, когда скорость испарения легких углеводородов наивысшая. В работе построена зависимость размеров вероятных зон застоя от направления и скорости ветра для трех разных высот (рисунок 2).

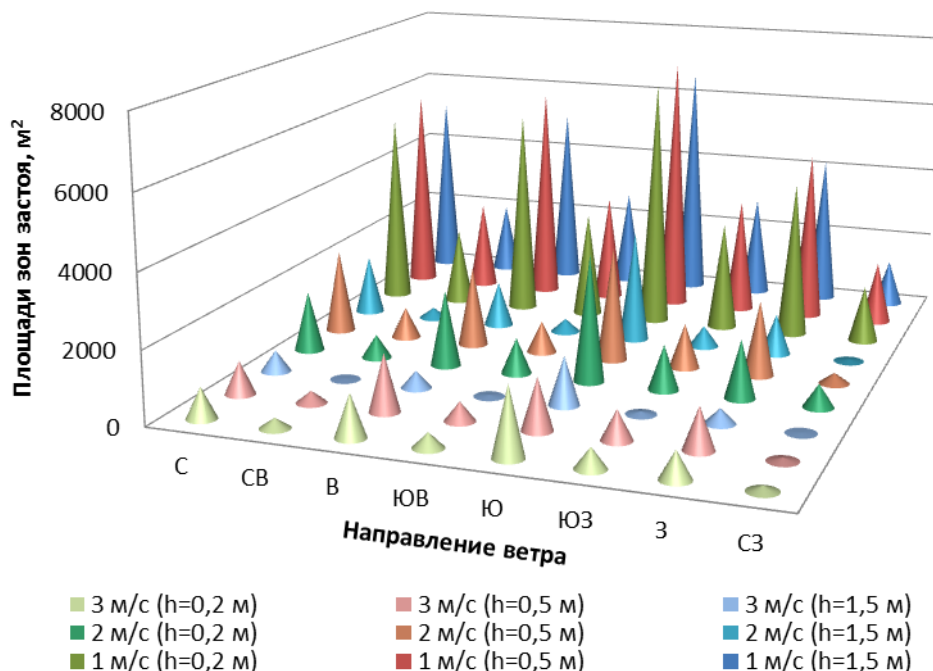


Рисунок 2 – Зависимость размеров вероятных зон застоя от направления и скорости ветра на разной высоте

На основании информации о застройке прилегающей территории и результатах вычислительных экспериментов с применением трехмерного моделирования можно сделать вывод, что рассмотренная ГНС, с точки зрения взрывопожароопасности, была построена без привязки к местности и без учета перспективы застройки прилегающей территории.

С учетом того, что безопасность объекта прямо пропорциональна вероятности появления источника зажигания на пути распространения облака и размерам зон застоя, разработан параметр оценки состояния безопасности объекта хранения легких углеводородов (далее – параметр) для направления ветра (НВ)  $X$ , который можно использовать в качестве сравнительного критерия:

$$K_{\sigma}(HB) = \frac{P(HB) \cdot S_{3.3.} \cdot (1 - \prod_{i=1}^L \prod_{n=1}^N [1 - Q_i(IZ_n / GC)])}{S_{n.y.}}, \quad (2)$$

где  $P(HB)$  – вероятность появления ветра направления  $X$ ;  $S_{3.3.}$  – площадь зон застоя при направлении ветра  $X$ ,  $m^2$ ;  $S_{n.y.}$  – площадь, занимаемая резервуарным парком и вспомогательными сооружениями за вычетом площади оборудования, зданий и сооружений,  $m^2$ ;  $Q_i(IZ_n/GC)$  – условная вероятность появления на пути

распространения облака топливо-воздушной смеси (ТВС) в  $i$ -м элементе объекта  $n$ -го источника зажигания, способного воспламенить горючую среду.

Наиболее значимым направлениям ветра, с точки зрения возможных наибольших человеческих и материальных потерь, должны соответствовать наименьшие значения параметра  $K_6$ . Уменьшение значений параметра свидетельствует о повышении безопасности объекта в нештатных ситуациях.

Вероятность появления ветра определенного направления целесообразно вычислять на основе многолетних статистических данных для летнего периода года на рассматриваемой территории. Расчет площадей зон застоя рекомендуется производить на высотах 0,2, 0,5 и 1,5 м. Для расчета разработанного параметра  $K_6$  необходимо брать наибольшее из рассчитанных значений площади зоны застоя.

Информация о зонах застоя на территории объектов хранения легких углеводородов представляет ценность не только на этапе проектирования при внесении объемно-планировочных изменений, но и на этапе эксплуатации. Вероятность воспламенения облака ТВС можно снизить за счет уменьшения частоты появления на пути его распространения источника зажигания, способного воспламенять горючую среду.

Потенциально возможны ситуации, когда вносимые изменения приводят к уменьшению значения параметра при одних направлениях ветра, но при этом способствуют увеличению значений параметра при других направлениях ветра. Для решения данной проблемы в качестве проверочного значения предлагается использовать результирующий параметр оценки состояния безопасности объекта (формула 3).

$$K_p = \frac{\sum_{i=1}^n K_i(HB)}{n}, \quad (3)$$

где  $K_i(HB)$  – параметр оценки состояния безопасности объекта хранения легких углеводородов при определенном направлении ветра;  $n$  – количество рассматриваемых направлений ветра ( $n = 8; 16$ ).

В работе проведен расчет значений разработанного параметра  $K_6$  при различных объемно-планировочных и организационно-технических решениях для

рассмотренной ГНС. Результаты представлены в 5 главе.

**Четвертая глава** посвящена верификации полученных результатов вычислительных экспериментов по определению скорости движения воздушных потоков для объектов хранения легких углеводородов, на основе проведенных лабораторных и натурных экспериментов.

Лабораторный эксперимент. Лабораторная модель построена в масштабе 1:100 к существующей ГНС. В качестве установки имитации ветра использовались 10 вентиляторов диаметром 92 мм каждый. С помощью реостата задавались различные скорости движения воздушных потоков – 2, 3, 4 м/с. По направлению движения воздушного потока пространство ограничивалось с боков и сверху стенками из оргстекла. В лабораторном стенде была предусмотрена возможность помещения в рабочее пространство щупа метеометра.

В ходе проведения экспериментов замеры производились на трех высотах (0,9; 1,5; 3,5 см, что соответствует высоте 0,9; 1,5; 3,5 м на реальном объекте) минимум в десяти точках стенда. В каждой точке производилось по пять замеров.

Один из вариантов сопоставления результатов вычислительного и лабораторного экспериментов отражен на рисунке 3.

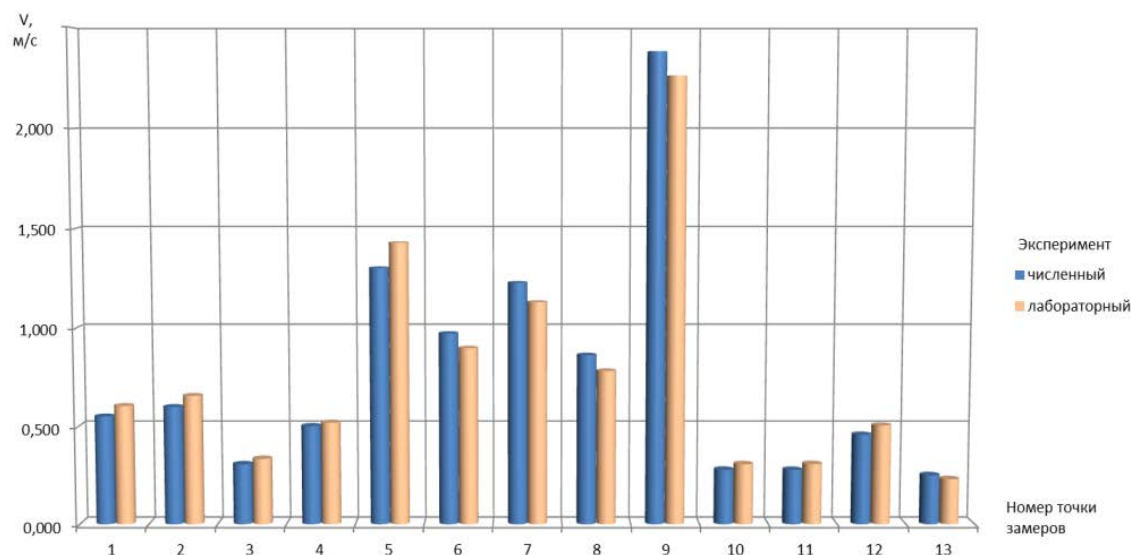


Рисунок 3 – Результаты вычислительного и лабораторного экспериментов на высоте 1,5 м над уровнем земли при южном ветре силой 3 м/с

Наблюдалось удовлетворительное согласование результатов вычислительного и лабораторного экспериментов. Максимальное расхождение результа-

тов численного и лабораторного экспериментов не превышало 11 %.

Натурный эксперимент. Замеры производились на территории газонаполнительной станции в шести различных местах на трех высотах – 0,2; 0,5; 1,5 м. В каждой точке объекта замеры осуществлялись по пять раз.

Один из вариантов сопоставления результатов численного и натурального экспериментов отражен в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты численного и натурального экспериментов на высоте 1,5 м над уровнем земли при юго-западном ветре силой 2 м/с

Номер точки замеров	1	2	3	4	5	6
Среднее значение скорости движения воздушного потока при натурном эксперименте, м/с	0,94	1,01	1,85	2,72	1,90	0,68
Значение скорости движения воздушного потока при численном эксперименте, м/с	0,88	1,09	2,07	3,01	1,65	0,78
Отклонение, %	5,94	8,04	11,73	10,76	12,91	14,89

Проведенные исследования свидетельствуют об удовлетворительном согласовании результатов численного и натурального экспериментов. Максимальное расхождение данных не превышало 15 %.

**В пятой главе** представлена разработанная методика оценки безопасности объектов хранения легких углеводородов, позволяющая проводить комплексную оценку зон застоя с применением систем трехмерного моделирования и подбирать наиболее результативное решение по обеспечению безопасности. На рисунке 4 представлен алгоритм оценки безопасности объектов хранения легких углеводородов, являющийся основой предложенной методики. Применение данной методики позволяет прогнозировать вероятные зоны застоя для объектов с учетом метеорологических условий местности расположения и предусматривает повышение их безопасности, в том числе за счет объемно-планировочных изменений на всех этапах жизненного цикла объекта.

Разработанная методика оценки безопасности объектов хранения легких углеводородов базируется на результатах исследований, полученных во 2-ой и 3-ей главах, апробирована для объекта моделирования (ГНС).

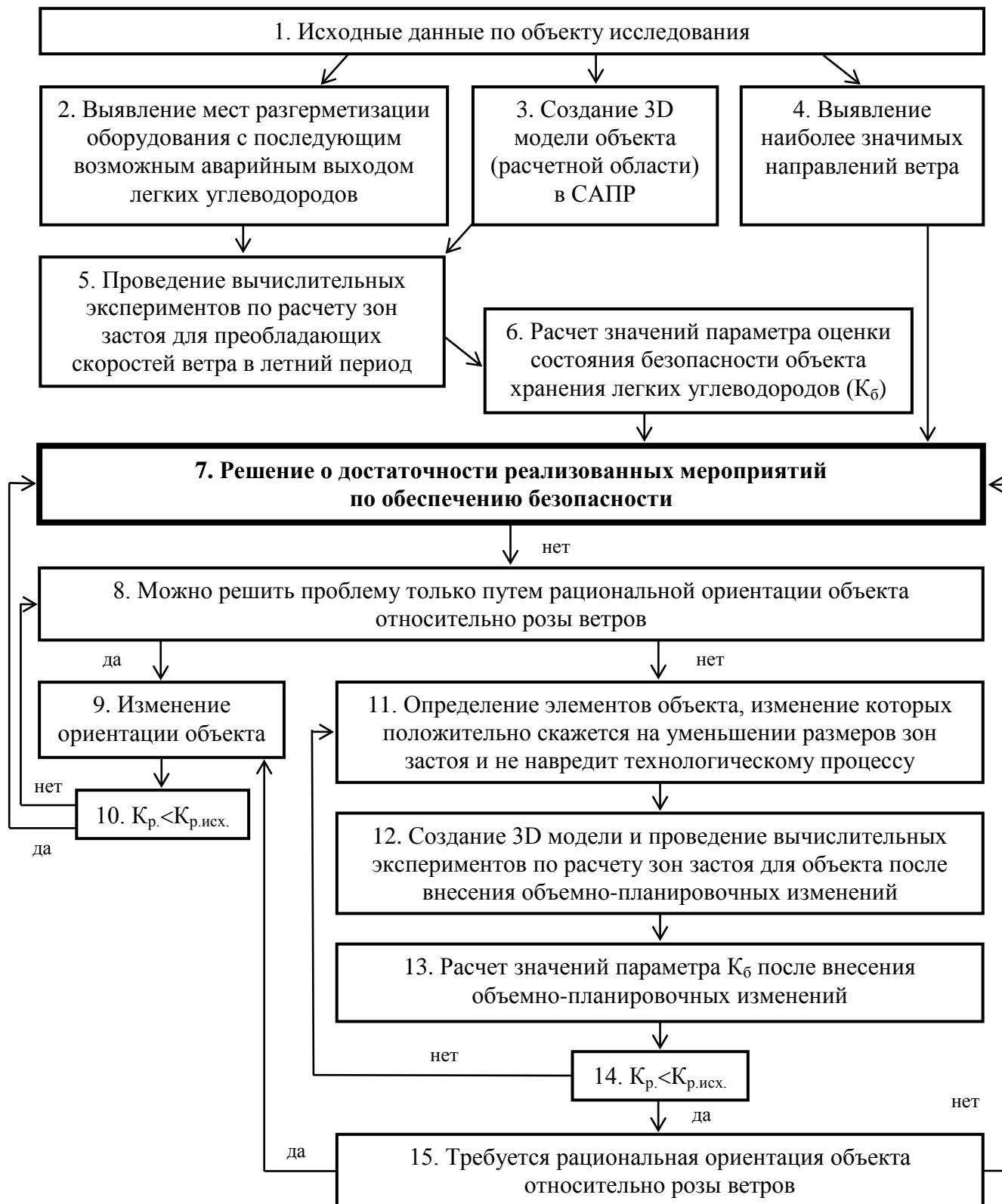


Рисунок 4 – Алгоритм оценки безопасности объектов хранения легких углеводородов

Важным этапом методики является оценка состояния безопасности объекта по разработанному параметру (формула 2). Результаты расчета параметра

$K_6$  для рассматриваемой ГНС (этап алгоритма № 6) представлены на рисунке 5.

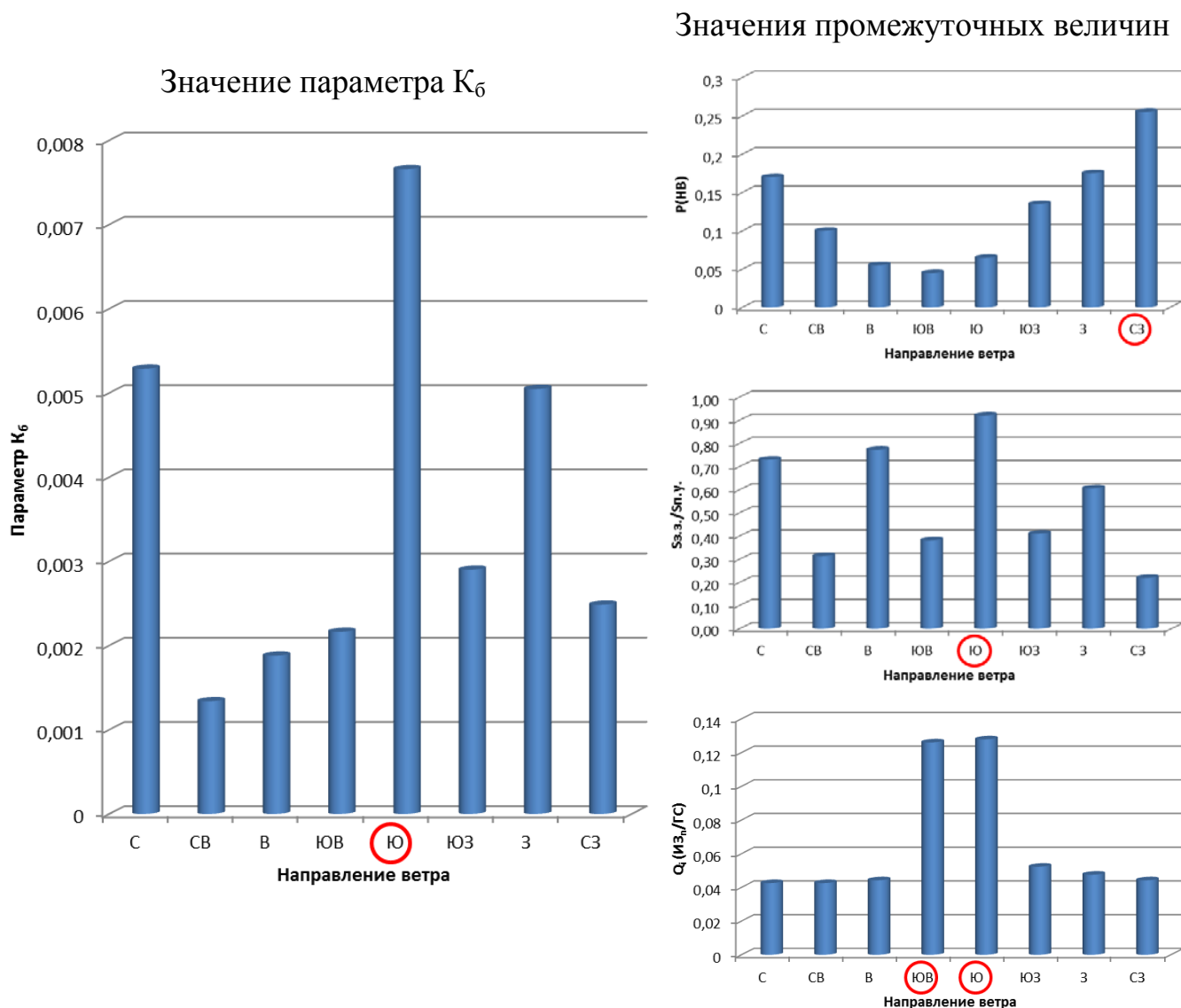


Рисунок 5 – Результаты расчета параметра  $K_6$  для ГНС

Из результатов расчетов видно, что наибольшее значение параметра получено для южного направления ветра в силу комбинации различных факторов. В связи с этим, наибольшее внимание при внесении объемно-планировочных и организационно-технических изменений необходимо уделить южному направлению ветра.

Для рассмотренной ГНС решить проблему повышения безопасности только путем рациональной ориентации объекта относительно розы ветров не представляется возможным, поэтому необходимо вносить изменения в элементы объекта (этапы алгоритма № 11, 12).



С целью реализации этих этапов алгоритма и изучения размеров вероятных зон застоя рассмотрено шесть вариантов внесения объемно-планировочных изменений, а также их комбинация. Всего проанализировано 13 различных вариантов планировки территории объекта, по каждому из которых проведены вычислительные эксперименты (пример визуализации зон застоя представлен на рисунке 6).

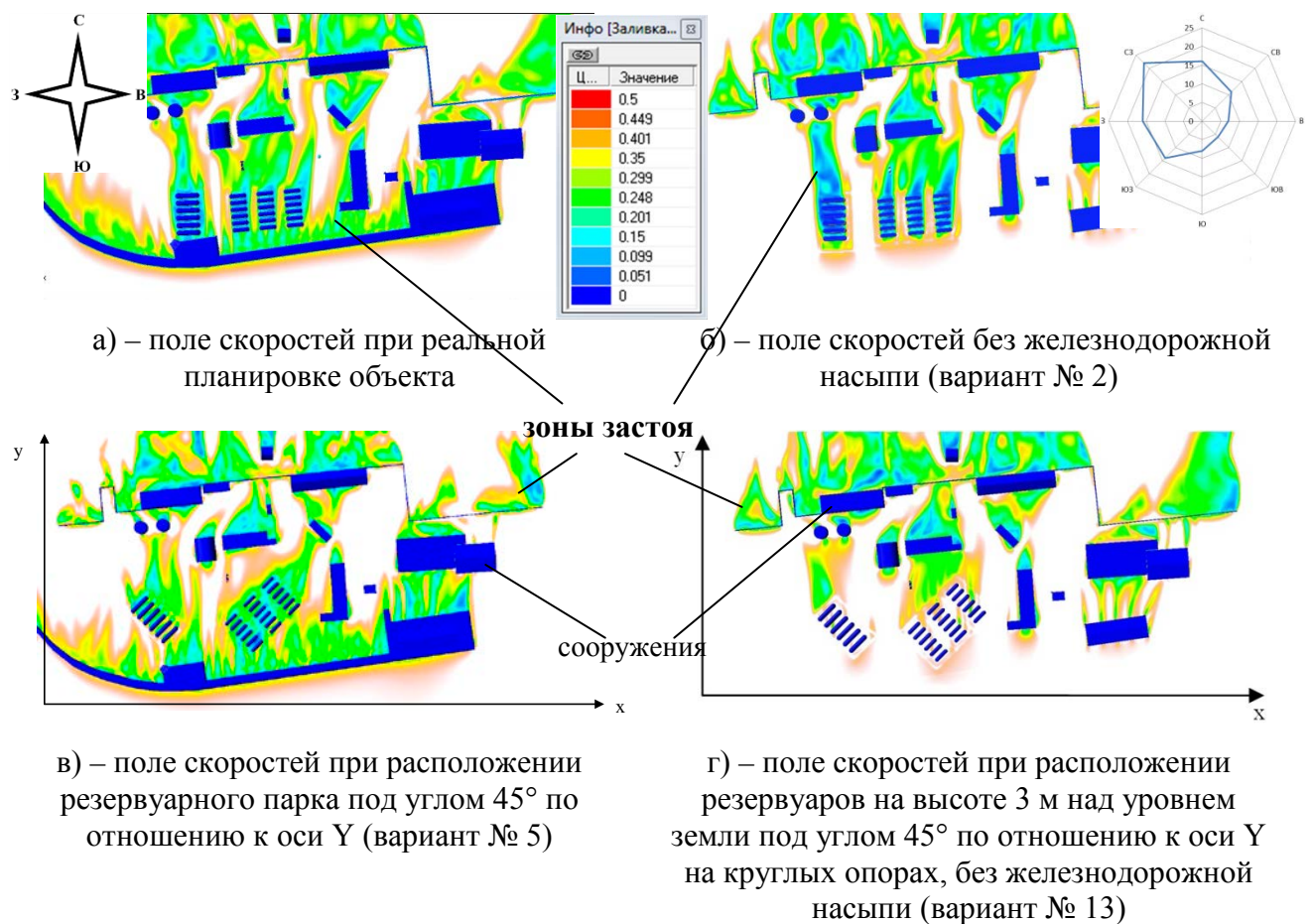


Рисунок 6 – Поле скоростей движения воздушных потоков при различных вариантах планировки территории газонаполнительной станции (ветер южный; скорость 1 м/с; высота 1,5 м; вид сверху)

Для выявления наиболее результативных мероприятий проведены индивидуальные экспертные оценки одиннадцатью специалистами по 10-бальной шкале по каждому показателю (рисунок 7). Критериями оценок являлись:

- 1) уровень промышленной безопасности;
- 2) экономическая эффективность;
- 3) уровень экологической безопасности.

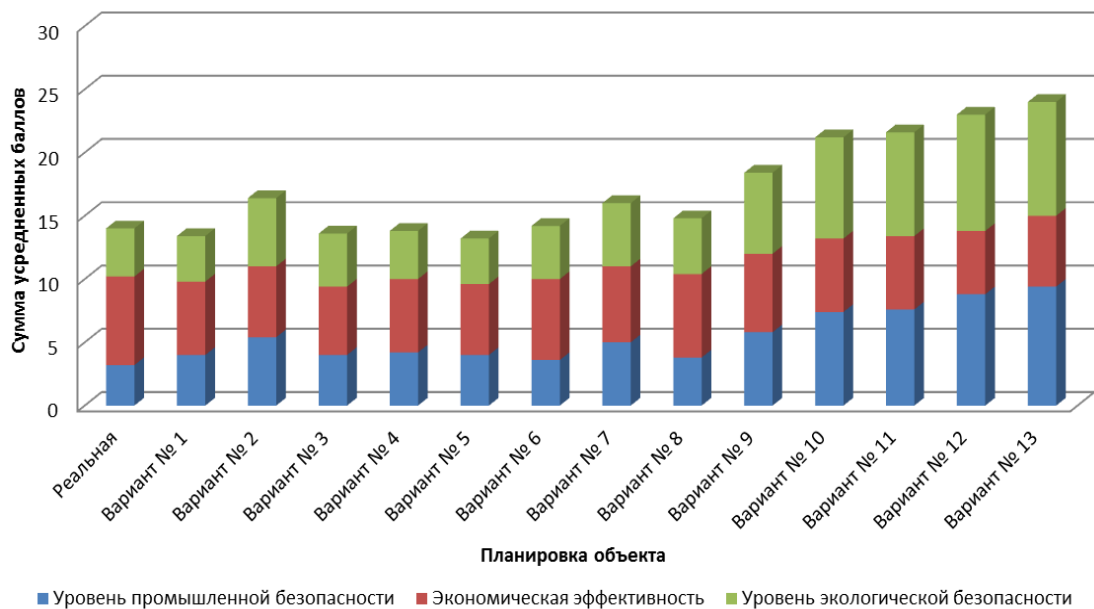


Рисунок 7 – Графическая интерпретация результата экспертной оценки объемно-планировочных решений по повышению безопасности объекта

Результаты экспертных исследований показали, что наиболее эффективным (сумма усредненных баллов 24,0) является вариант № 13, который подразумевает комплекс объемно-планировочных решений, включающий в себя расположение резервуаров на высоте 3 м над уровнем земли под углом атаки 45° к горизонтальной оси резервуара на круглых опорах и отказ от железнодорожной насыпи за счет прокладывания рельсов на высоте 0,15 м над уровнем земли. Несмотря на снижение экономической эффективности, реализация предложенных решений, по мнению экспертов, значительно повышает уровни промышленной и экологической безопасности.

Внесение объемно-планировочных изменений способно привести к уменьшению значения параметра  $K_6$  за счет уменьшения размеров зон застоя. В свою очередь, немаловажным фактором являются решения организационно - технического характера. В частности, за счет отказа от проведения огневых работ при техническом освидетельствовании газовых баллонов на территории объекта (отказ от огневых работ или перенос их за территорию предприятия) значение вероятности появления источника зажигания и, как следствие, значение  $K_6$  для южного ветра снижается в 2,2 раза (рисунок 8).

В случае совместной реализации предложенных объемно-планировочных

и организационно-технических изменений (рисунок 8), значение параметра  $K_6$  уменьшается в диапазоне от 2,8 до 6,4 раза в зависимости от направления ветра. В частности, для южного направления ветра значение параметра снижено в 6,4 раза.

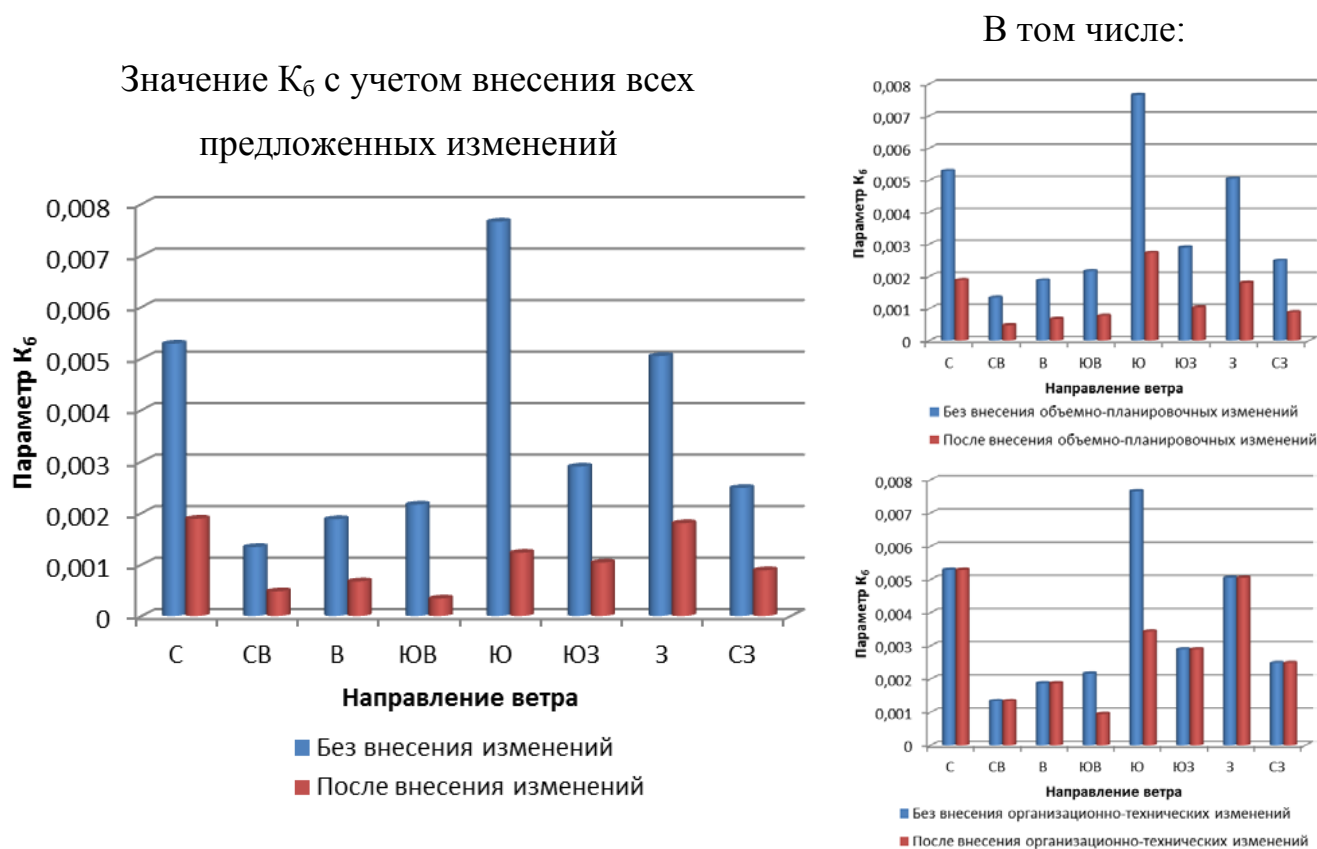


Рисунок 8 – Сравнение значений параметра  $K_6$  для ГНС до и после внесения объемно-планировочных и организационно-технических изменений

С целью проверки того, как внесенные изменения отразились на безопасности объекта в целом, рассчитан результирующий параметр  $K_p$  (формула 3). Для рассмотренного объекта значение  $K_p$  уменьшилось в 3,5 раза с 0,0036 до 0,00104, что свидетельствует о результативности реализованных мероприятий.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование включает в себя результаты аналитического анализа, численных, лабораторных и натурных экспериментов. На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

1 Предложена функциональная зависимость массы испарившихся легких углеводородов от времени на примере ШФЛУ и пропана. Указанная зависимость адаптирована к определенным условиям и позволяет проводить оперативный расчет при сохранении высокой достоверности получаемых результатов (отклонение от реальных значений в пределах 11 %).

2 Проведено расчетное моделирование образования вероятных зон застоя при различных объемно-планировочных решениях путем использования системы трехмерного моделирования и метода конечных объемов. Установлено, что для площадок резервуарных парков с легкими углеводородами предприятий нефтегазовой отрасли наиболее результативными являются мероприятия по увеличению высоты расположения резервуаров, уменьшению угла атаки к горизонтальной оси резервуара и отказ от железнодорожной насыпи за счет прокладывания рельсов на уровне земли.

3 Проведена верификация результатов моделирования путем сравнения данных, полученных в ходе проведения как лабораторных и вычислительных экспериментов с одной стороны, так и в ходе проведения натурных и численных замеров с другой стороны. Наблюдалось удовлетворительное согласование результатов. Максимальное расхождение данных вычислительного и лабораторного экспериментов не превышало 11 %, натурных и вычислительных экспериментов – 15 %.

4 Разработан параметр оценки состояния безопасности объекта хранения легких углеводородов ( $K_6$ ) для расчета оптимального расположения сооружений и их конструктивных изменений. Установлено, что путем внесения объемно-планировочных и организационно-технических изменений, направленных на уменьшение размеров зон застоя и снижение вероятности появления источника зажигания, можно добиться увеличения безопасности не менее, чем в 2,8 раза.

5 Впервые разработана и научно обоснована методика оценки безопасности объектов хранения легких углеводородов в нештатных ситуациях. Она позволяет проводить комплексную оценку зон застоя с применением систем трехмерного моделирования и подбирать наиболее эффективное решение по обеспечению безопасности на всех этапах жизненного цикла объекта. Разработанная методика и алгоритм к ней учитывают объемно-планировочные

особенности объекта и вероятность появления источника зажигания ТВС. Методика и алгоритм апробированы для объекта моделирования (ГНС).

**Основные положения диссертации опубликованы в 12 основных работах:**

Материалы, опубликованные в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, утвержденных ВАК РФ:

1 Пермяков, В. Н. Применение 3-D моделирования для снижения пожаро-, взрывоопасности газонаполнительных станций / В. Н. Пермяков, В. Г. Парфенов, А. В. Солодовников, **М. В. Омельчук** // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2013. – № 5. – С. 82-87.

2 Пермяков, В. Н. Методика оценки устойчивости объектов хранения сжиженных углеводородных газов / В. Н. Пермяков, В. Г. Парфенов, **М. В. Омельчук** // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2015. – № 6. – С. 73-79.

3 Пермяков, В. Н. Повышение устойчивости объектов хранения сжиженных углеводородных газов с использованием технологии вычислительной гидродинамики / В. Н. Пермяков, В. Г. Парфенов, **М. В. Омельчук** // Естественные и технические науки. – 2013. – № 4. – С. 316-319.

4 Пермяков, В. Н. Применение CFD-технологий для определения зон застоя на объектах хранения сжиженных углеводородных газов / В. Н. Пермяков, В. Г. Парфенов, **М. В. Омельчук** // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2013. – № 2(24). – С. 192-196.

5 Пермяков, В. Н. Лабораторная проверка результатов, полученных в FlowVision / В. Н. Пермяков, **М. В. Омельчук** // Естественные и технические науки. – 2014. – № 1(69). – С. 260-262.

6 Пермяков, В. Н. Внесение архитектурно-планировочных изменений с целью уменьшения зон застоя / В. Н. Пермяков, **М. В. Омельчук** // Естественные и технические науки. – 2014. – № 1(69). – С. 288-289.

7 Пермяков, В. Н. Анализ аварийных процессов при проливах и испарении широкой фракции легких углеводородов на газоперерабатывающих заводах /

В. Н. Пермяков, **М. В. Омельчук** // Научное обозрение. – 2014. – № 7. – С. 286-289.

8 Пермяков, В. Н. Обоснование адекватности численных результатов скорости движения воздушных потоков для объектов хранения сжиженного углеводородного газа / В. Н. Пермяков, В. Г. Парфенов, **М. В. Омельчук** // Научное обозрение. – 2014. – № 7. – С. 290-293.

9 Пермяков, В. Н. Натурная проверка адекватности вычислительных результатов / В. Н. Пермяков, **М. В. Омельчук** // Естественные и технические науки. – 2015. – № 9(87). – С. 151-153.

Статьи и тезисы докладов, опубликованные в других изданиях:

10 Пермяков, В. Н. Использование программного комплекса FlowVision для прогнозирования возможных аварийных ситуаций на опасных производственных объектах / В. Н. Пермяков, А. В. Солодовников, **М. В. Омельчук** // Материалы восьмой всероссийской научно-технической конференции «Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна (опыт, инновации)». Том I. – Тюмень: ТюмГНГУ. – 2012. – С. 243-249.

11 **Омельчук, М. В.** Применение технологий вычислительной гидродинамики при проектировании объектов хранения сжиженных углеводородных газов / М. В. Омельчук // Материалы международной научно-технической конференции «Нефть и газ Западной Сибири». Т. 3. – Тюмень: ТюмГНГУ. – 2013. – С. 112-117.

12 **Омельчук, М. В.** Факторы, определяющие устойчивость функционирования объектов хранения пропан-бутановой смеси / М. В. Омельчук // Материалы девятой международной научно-технической конференции «Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна (опыт, инновации)». Том 2. – Тюмень: ТюмГНГУ. – 2014. – С. 255-258.