

ВВЕДЕНИЕ

В связи с активным ростом промышленного производства, усложнением технологических процессов, разработкой новых технологий, всё больше становится **актуален** вопрос о промышленной безопасности, о влиянии производства на окружающую среду. Поэтому необходимо применение новых и более эффективных методов для предотвращения и ликвидации чрезвычайных ситуаций техногенного характера.

Существует большое количество работ, посвящённых применению технологий вычислительной гидродинамики (ВГД), но данный вопрос остаётся **актуален** до сих пор, так как не существует общепринятой системы моделей. Применение данных технологий позволяет не только смоделировать аварийный разлив (выброс), но и вычислить наиболее эффективный метод ликвидации чрезвычайной ситуации, а также произвести оценку техногенной аварии на состояние окружающей среды.

На сегодняшний день резервуарные парки для хранения смеси пропана и бутана являются важными технологическими сооружениями, участвующими в цепочке хранения, транспортировки и утилизации данных веществ. В связи с высокой скоростью развития технологического производства, появлением новых автомобилей на газовом топливе и увеличением количества сырья на нефтехимических производствах становится **актуален** вопрос использования и потребления пропан-бутановой смеси во всем мире.

Проблема повышения безопасности хранения пропана и бутана в резервуарных парках продолжает оставаться **актуальной**. Воздействие агрессивной окружающей среды, несоблюдение технологического режима обслуживания, несвоевременное проведение планово-предупредительных ремонтов могут привести к разгерметизации и разрушению эксплуатируемого оборудования. Существует вероятность образования облака топливно-воздушной смеси (ТВС), которое при определённых

концентрациях с воздухом будет образовывать взрывопожароопасную смесь. Поэтому имеется значительная вероятность нанесения ущерба станциям, участвующим в хранении и транспортировке пропан-бутановой смеси (нефтеперерабатывающие и газовые заводы, перевалочные портовые и кустовые базы), соседним объектам и жилым поселениям.

1. АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ, НА КОТОРЫХ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ПРОПАН И БУТАН

Пропан и бутан – это основные компоненты сжиженных углеводородных газов (СУГ). Пропан (C_3H_8) – это органическое вещество со слабым запахом, которое содержится в природном газе, является ядовитым и взрывоопасным. Для человека пропан малотоксичен и может вызывать головокружение или наркотическое опьянение. Бутан (C_4H_{10}) – это органический газ с ярко выраженным своеобразным запахом, который является взрывопожароопасным. Бутан имеет интенсивный специфический запах и чрезмерное его вдыхание способно привести к смертельному исходу. Содержание сероводорода и серы в смеси пропан-бутана составляет не более чем 0,013%.

Сжиженные газы, попадая на тело человека, могут вызывать обморожения, похожие на ожоги. Предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны составляет 300 мг/м³. Пропан-бутан относят к веществам 4-го класса опасности.

Смесь пропан-бутана чаще всего хранят в сниженном виде, так как это значительно упрощает транспорт и технологический процесс. Высокое давление и температура воздуха – это два главных условия образования сжиженного газа. Пропан закипает при $-42^{\circ}C$, а при чрезмерном нагревании способен расширяться, поэтому может повредить емкость для хранения, либо взорваться. При температуре $-0,5^{\circ}C$ бутан переходит из сжиженного в газообразное состояние, что является основным различием данных

углеводородов. Пропан-бутан не замерзает и хорошо испаряется, исключая вероятность возникновения взрыва или повреждения сосуда [1].

При взаимодействии с воздухом пропан-бутан образует взрывопожароопасную смесь при концентрации паров от 1,5 до 9,5 %. Температура самовоспламенения бутана 405°С, а пропана 470°С [2].

Одним из важнейших аспектов безопасности является хранение пропана и бутана, которое чаще всего реализуют на нефтеперерабатывающих и газовых заводах, в резервуарных парках на перевалочных и кустовых базах, в резервуарах газораздаточных станций (ГРС), а также на станциях пикового потребления газа. Примерами таких предприятий являются ООО «Газпром переработка» (Сосногорский ГПЗ), АО «Сахатранснефтегаз» (Якутский ГПЗ), ООО «СИБУР Тобольск», ЗАО «Сибур-Химпром», ООО «ТрансНефтеГаз» и др.

Для хранения пропан-бутана под давлением используются стальные резервуары цилиндрической и сферической формы. Цилиндрические резервуары, имеющие эллиптические днища, используются чаще, чем сферические. Их устанавливают под землей и на ее поверхности, в отличие от сферических.

Пожарная опасность смеси пропан-бутана определяется возможностью разгерметизации резервуаров и появлением паровоздушного облака. Так как пропан-бутан тяжелее воздуха (удельный вес пропана 1,57, бутана 2,10), то он может скапливаться в непроветриваемых местах, распространяться по поверхности в направлении воздушного потока на большие расстояния, образуя зоны взрывоопасных концентраций. Поэтому для сохранения безопасности необходимо обеспечить максимальную герметичность емкостей, коммуникаций, насосных аппаратов, а также строгое соблюдение технологического режима обслуживания [3].

2 февраля 2014 г в Красноармейском районе Донецкой области на железнодорожном участке «Удачное-Межевая» во время следования грузового поезда из 66 цистерн с пропан-бутаном сошли с рельсов 26

цистерн. Для тушения пожара, который продлился 12 часов, было задействовано 59 единиц техники. Зону разлива покрывали воздушно-механической пеной. Для предотвращения угрозы жителям ближайших поселков, было эвакуировано 250 человек. 10 декабря 2016 года товарный поезд, перевозивший 26 цистерн с пропан-бутаном, сошел с рельсов в населенном пункте Хитрино Шуменской области Болгарии. Произошел взрыв, в результате чего пострадало 24 человека, из которых 4 погибло, также было повреждено несколько построек.

Так как при пожаре или взрыве газозвудушных смесей, возникшие аварийные и чрезвычайные ситуации (ЧС) влекут за собой большое количество жертв, необходимо соблюдать технические требования безопасности хранения и перевозки пропан-бутана. Для более глубокого и детального понимания следует знать особенность его физико-химических свойств, а также особенность поведения облака ТВС.

3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА FLOWVISION

Программный комплекс FlowVision используется с целью моделирования трехмерных течений жидкости и газа в технических и природных объектах, а также визуализации данных течений с помощью компьютерной графики [6]. Он базируется на численном решении трехмерных уравнений динамики жидкости и газа, включающие в себя законы сохранения массы, импульса (уравнения Навье-Стокса), уравнения состояния.

FlowVision эффективно используется для решения многих промышленных задач, в том числе:

- внешняя аэро-гидродинамика: обтекание автомобилей, кораблей, самолетов, ракет, зданий и сооружений;

- внутренняя аэро-гидродинамика: течение в салоне автомобиля и в пространстве под капотом, вентиляция внутренних отсеков, движение газов и жидкостей по магистралям и трубопроводам [7];
- моделирование турбомашин: течение в турбинах, компрессорах, насосах;
- моделирование процессов горения: сжигание природного газа в котлах ТЭЦ, образование оксидов азота;
- моделирование движения нефти и газа в насосных станциях, трубопроводах, движение нефти и газоконденсата в пластах месторождений, задачи перемешивания жидкостей в химических реакторах и специальных резервуарах, в том числе с учетом выделения тепла, процессы удаления отложений в нефтяных резервуарах [7];
- моделирование экологических процессов: моделирование процессов распространения загрязнений и примесей в атмосфере и водной среде, процессов локализации и ликвидации разливов нефти отопление, распространение пожаров и задымлений;
- управление микроклиматом: отопление, вентиляция и кондиционирование помещений [7].

В FlowVision проект отображается в виде совокупности узлов, объединенных в дерево проекта (рис.5), в котором модель в процессе задания и редактирования параметров разделяется на конструктивные элементы.

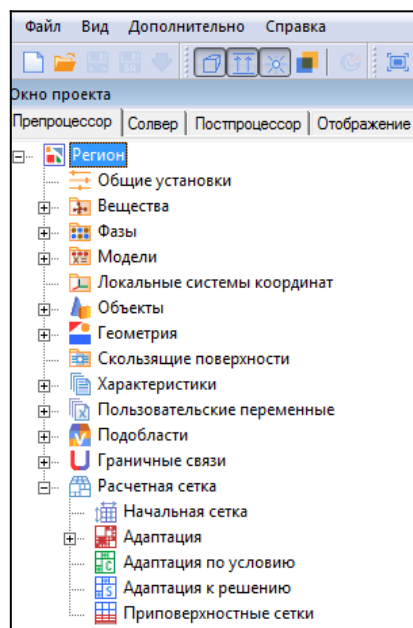


Рисунок 5. Фрагмент дерева проекта в FlowVision

Важность современных задач обеспечения безопасности требует интенсивного развития прикладных программ, без которых практически невозможно создание эффективных систем прогнозирования, предупреждения и мониторинга аварий, рационального выбора защитных сил и средств по локализации и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Таким образом, это делает актуальной задачу развития новых подходов, основанных на применении трехмерного моделирования и технологий ВГД. С помощью передовых средств визуализации и обработки данных, применяемых в FlowVision, можно быстро и эффективно проанализировать результаты расчетов и получить необходимые данные.

Вторым этапом является загрузка трехмерной модели в программный комплекс FlowVision. Перед тем как произвести расчет необходимо выбрать правильные физико-химические параметры окружающей среды (температура, давление, скорость и направление ветра) и пропан-бутановой смеси (давление, массовая доля, вязкость, теплопроводность, удельная теплоемкость и др.), а также необходимые законы, характеризующие течение, массоперенос и перемешивание смеси. После загрузки параметров модель выглядит следующим образом (рис.6).

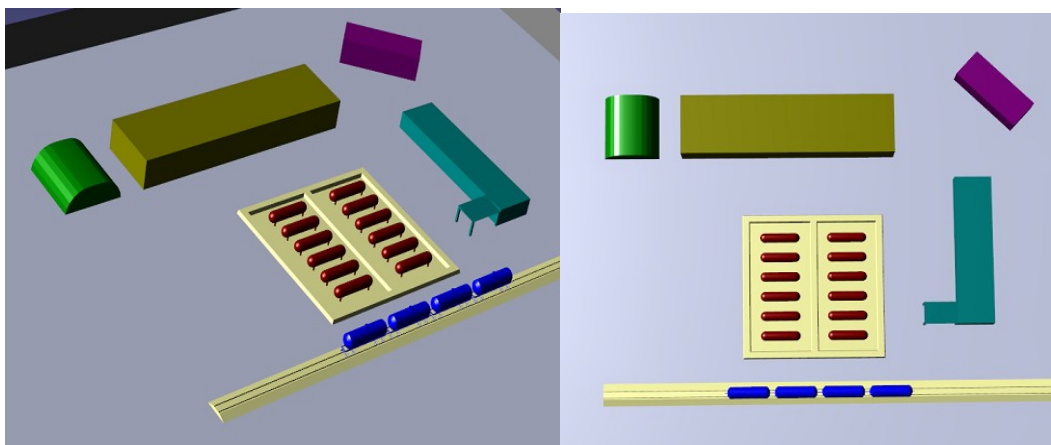


Рисунок 6. Вид модели после загрузки параметров в FlowVision (вид сбоку и сверху)

Далее необходимо задать расчетную сетку. При расчетах использовалась локально измельченная сетка, а общее количество ячеек составляло 1,6 млн. (рис.7,8).

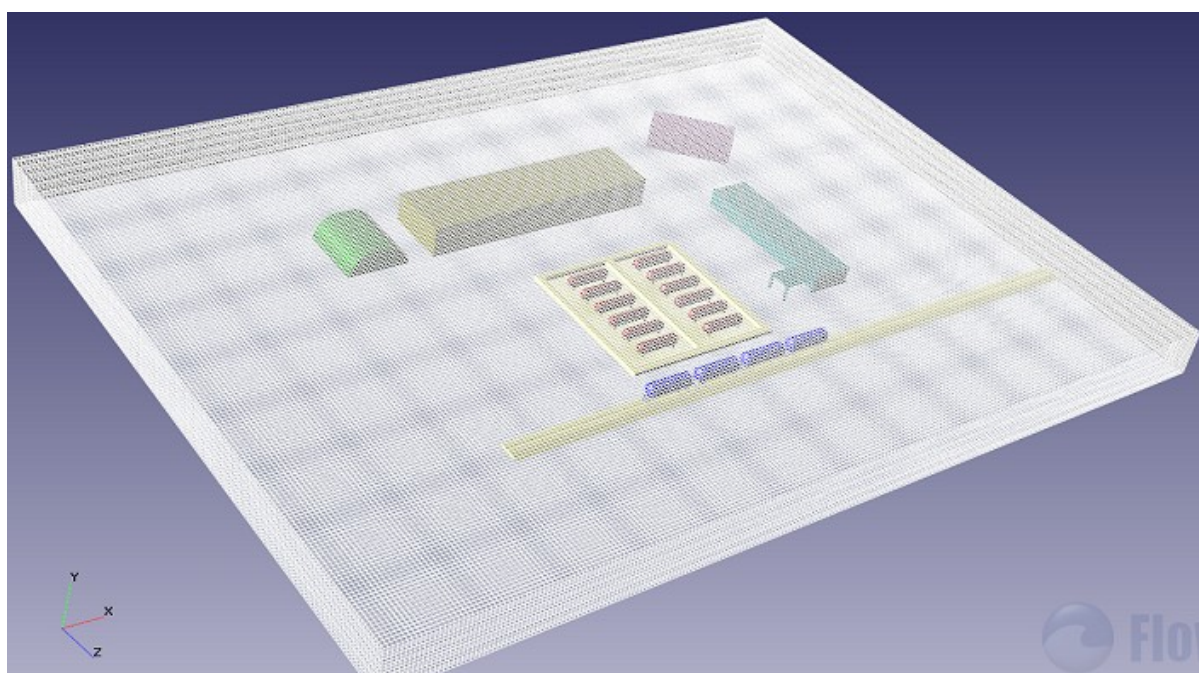


Рисунок 7. Начальная сетка в FlowVision

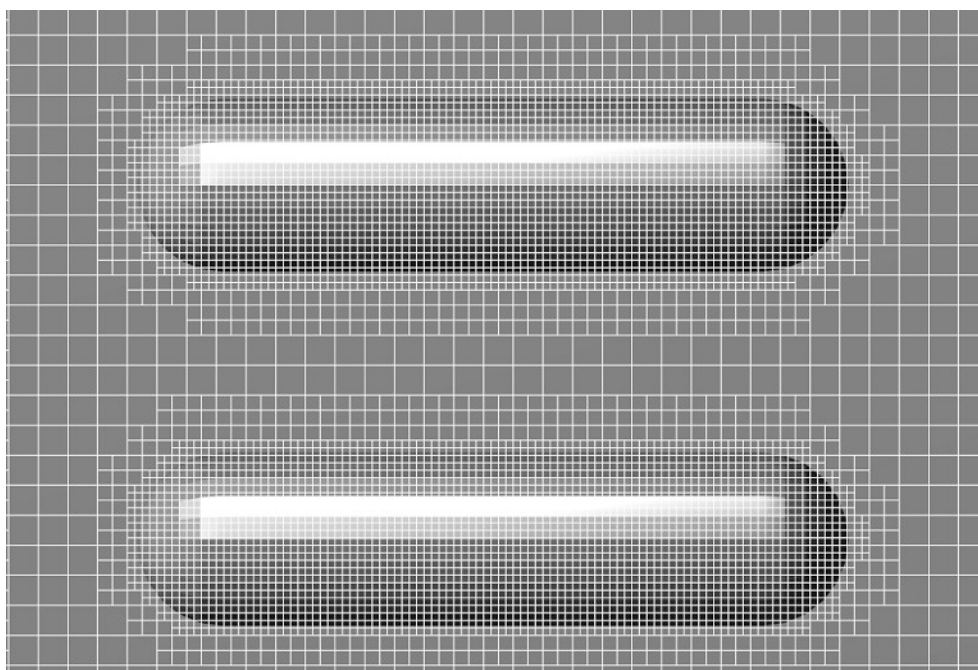
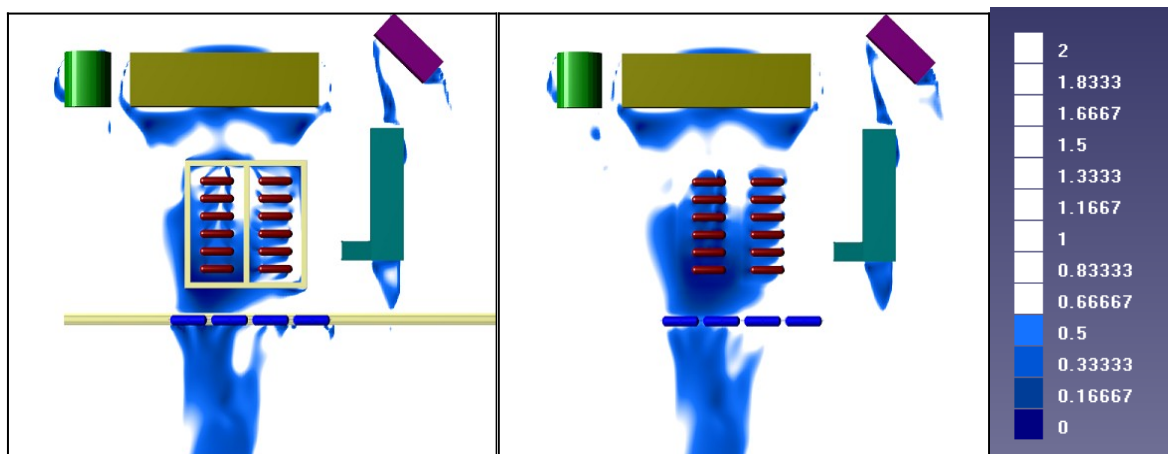


Рисунок 8. Расчетная сетка в FlowVision

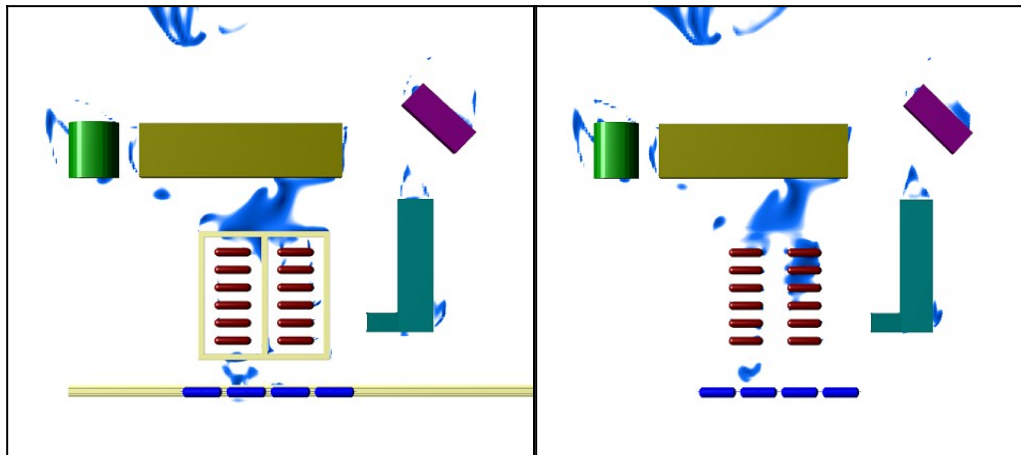
4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН ЗАСТОЯ

Третьим этапом работы является определение вероятных зон застоя при разных направлениях ветра и высоте замеров. Под зонами застоя подразумеваются участки на территории объекта, где скорость ветра не превышает 0,5 м/с.

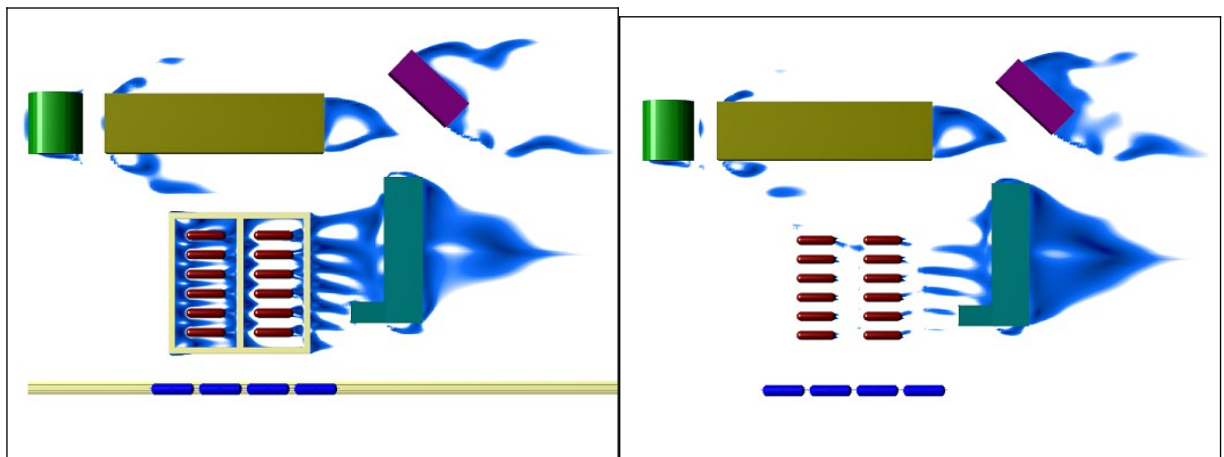
Примеры некоторых рассчитанных зон застоя в резервуарном парке при скорости ветра 2 м/с на высотах 0,5 м и 1,5 м над землей представлены на рисунках 9-16. Зоны застоя на рисунках имеют оттенки синего цвета.



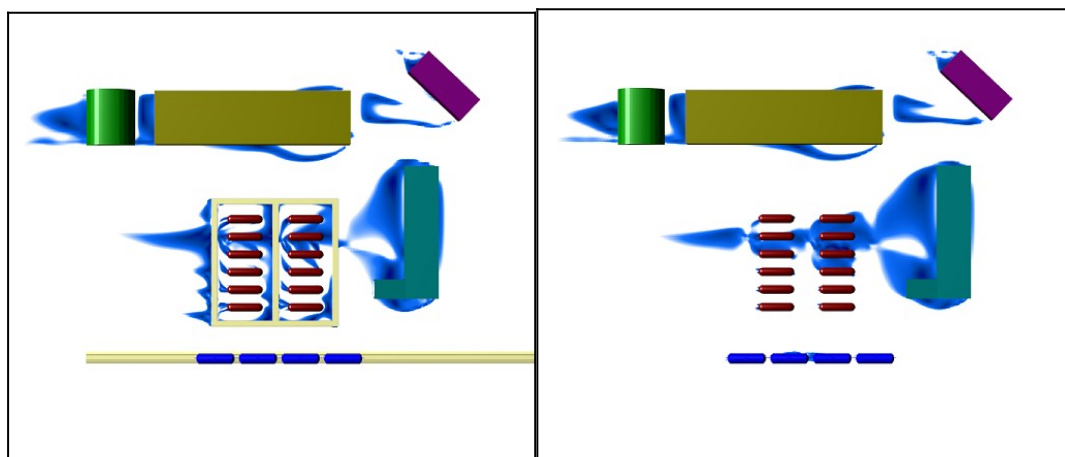
а) на высоте 0,5 м
б) на высоте 1,5 м
Рисунок 9. Зоны застоя при северном направлении ветра (скорость 2 м/с, вид сверху)



а) на высоте 0,5 м
б) на высоте 1,5 м
Рисунок 10. Зоны застоя при южном направлении ветра (скорость 2 м/с, вид сверху)

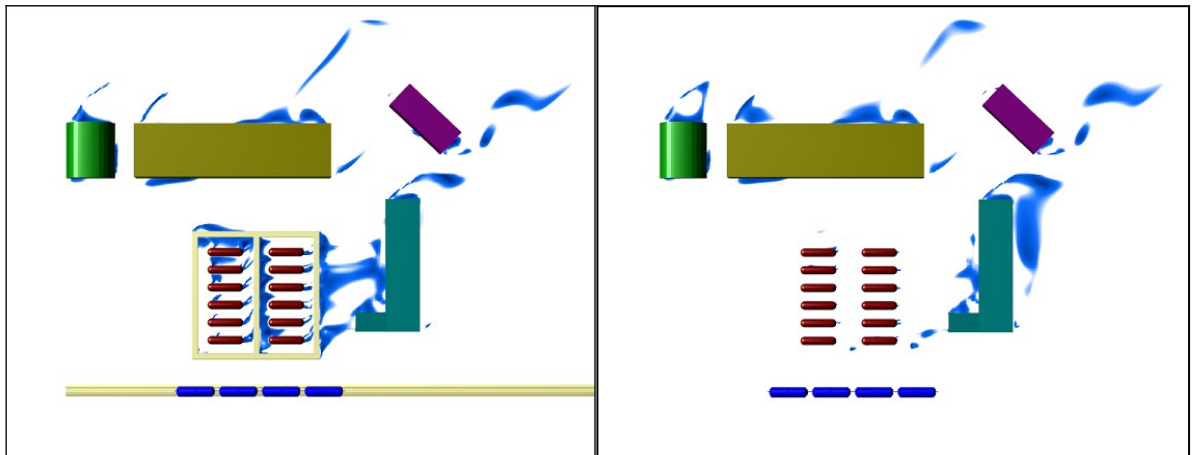


а) на высоте 0,5 м
б) на высоте 1,5 м
Рисунок 11. Зоны застоя при западном направлении ветра (скорость 2 м/с, вид сверху)



а) на высоте 0,5 м
б) на высоте 1,5 м

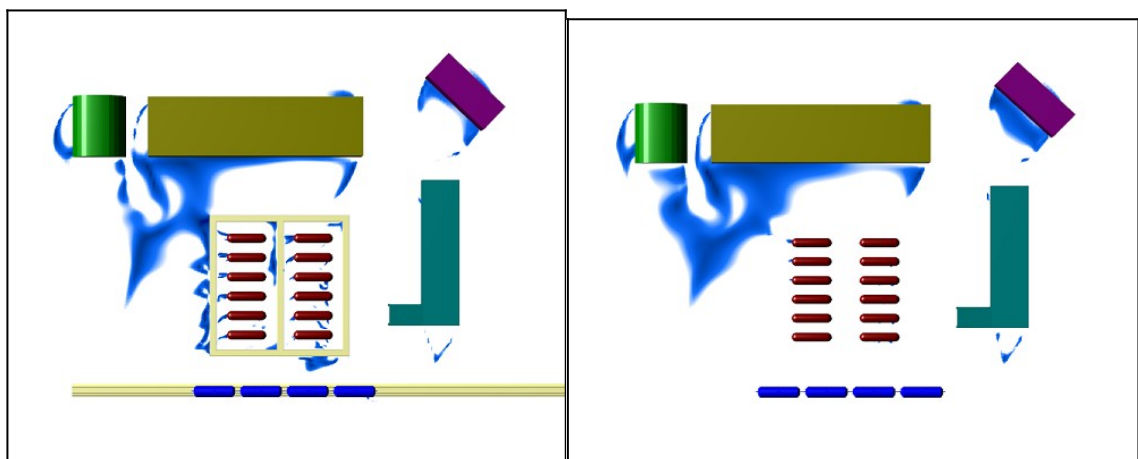
Рисунок 12. Зоны застоя при восточном направлении ветра (скорость 2 м/с, вид сверху)



а) на высоте 0,5 м

б) на высоте 1,5 м

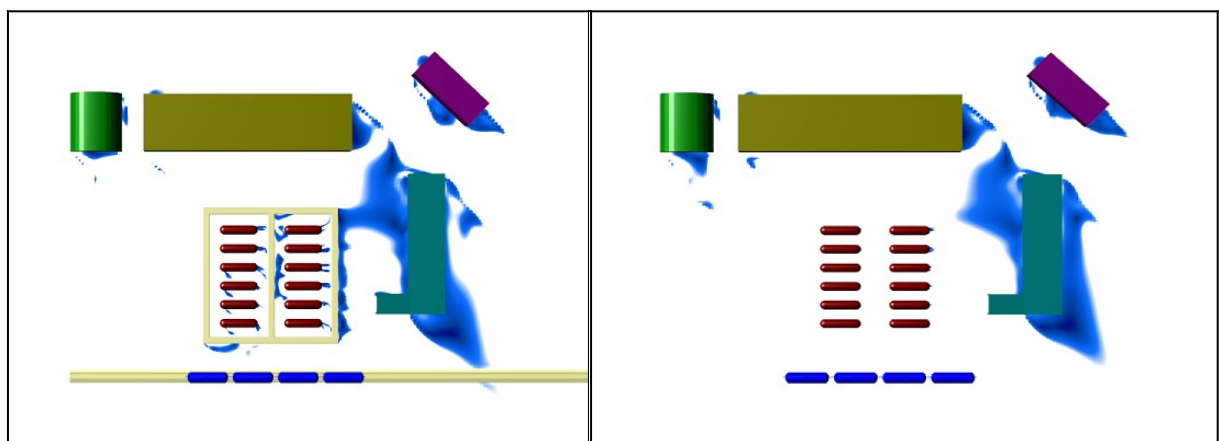
Рисунок 13. Зоны застоя при юго-западном направлении ветра (скорость 2 м/с, вид сверху)



а) на высоте 0,5 м

б) на высоте 1,5 м

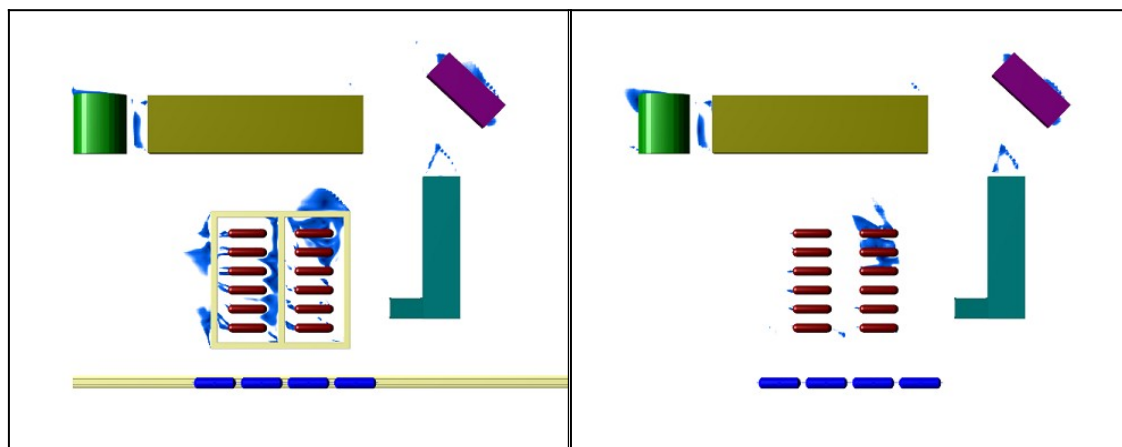
Рисунок 14. Зоны застоя при северо-восточном направлении ветра (скорость 2 м/с, вид сверху)



а) на высоте 0,5 м

б) на высоте 1,5 м

Рисунок 15. Зоны застоя при северо-западном направлении ветра (скорость 2 м/с, вид сверху)



а) на высоте 0,5 м

б) на высоте 1,5 м

Рисунок 16. Зоны застоя при юго-восточном направлении ветра (скорость 2 м/с, вид сверху)

Представленные выше примеры визуализации, полученных при расчете и заданных с помощью «цветовых контуров», отображают величину модуля скорости.

Визуализация с помощью «направленных векторов» представлена на рис.17.

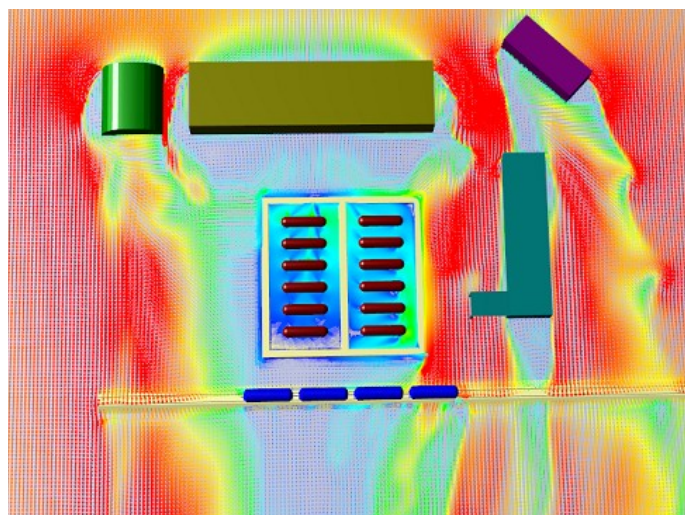


Рисунок 17. Зоны застоя при скорости северного ветра 2 м/с на высоте 0,5 м в виде векторов (вид сверху)

Рассчитанные значения площадей зон застоя в зависимости от направления ветра и высоты замеров при скорости 2 м/с представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Площади зон застоя в зависимости от направления ветра и высоты замеров при скорости 2 м/с

| Вид параметра | Направление ветра | Высота замеров, м | | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|------|------|------|------|------|------|
| | | 0,2 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 |
| Площади вероятных зон застоя, м ² | С | 2044 | 1758 | 2467 | 2539 | 2950 | 3279 | 3538 |
| | СВ | 890 | 924 | 943 | 1012 | 1237 | 1389 | 1437 |
| | В | 1503 | 1442 | 1398 | 1254 | 1330 | 1475 | 1466 |
| | ЮВ | 380 | 384 | 270 | 147 | 122 | 106 | 105 |
| | Ю | 630 | 648 | 546 | 646 | 843 | 831 | 824 |
| | ЮЗ | 1077 | 820 | 616 | 671 | 801 | 1047 | 1322 |
| | З | 2120 | 1826 | 1815 | 1472 | 1533 | 1399 | 1088 |
| | СЗ | 1024 | 1037 | 973 | 928 | 890 | 808 | 700 |

Таким образом, можно сделать вывод, что в результате движения воздушного потока по территории резервуарного парка, максимальные площади зон застоя наблюдаются при северном направлении ветра, а минимальные – при юго-восточном направлении ветра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы можно предложить следующие пути повышения безопасности резервуарного парка:

1. Изменение высоты расположения резервуаров;
2. Обеспечение безопасности на этапе проектирования и строительства, включающее рациональное расположение объектов резервуарного парка в зависимости от расстояния между объектами и розы ветров;
3. Выбор рационального расположения датчиков газоанализа;
4. Анализ возможности реализации технических мероприятий, направленных на повышение безопасности объекта.

Важность современных задач обеспечения безопасности требует интенсивного развития прикладных программ, без которых практически невозможно создание эффективных систем прогнозирования, предупреждения и мониторинга аварий. Таким образом, это делает актуальной задачу развития новых подходов основанных на применении

трехмерного моделирования и технологий ВГД. С помощью передовых средств визуализации и обработки данных можно быстро и эффективно проанализировать результаты расчетов и получить необходимые данные.

Таким образом, благодаря трехмерному моделированию и технологиям ВГД появляется возможность не только в оперативном порядке оценить масштаб вероятных аварий и негативных последствий, но и также оценить эффективность мер по их предупреждению, а также исключить гибель сотрудников на производстве и экономических потерь в результате аварийных ситуаций на объектах не только хранения и переработки углеводородов, но и на любом другом объекте, где присутствуют и используются в обороте данные вещества, например, на газотурбинных электростанциях и т.д.

В перспективе наших дальнейших исследований лежат вопросы моделирования облака ТВС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мишин, В.М. Переработка природного газа и конденсата: учебное пособие/ В.М. Мишин. – Москва: ИКЦ «Академия», 2005. – 448 с.
2. Устинов, П.И. Стационарные аккумуляторные установки: учебное пособие/ П.И. Устинов. – Москва: «Энергия», 1970. – 312 с.
3. Саушев, В.С. Пожарная безопасность хранения химических веществ: учебное пособие / В.С. Саушев. – Москва: «Стройиздат», 1982. – 126 с.
4. [Князьков, В.В.](#) Геометрическое моделирование в SolidWorks / В.В. [Князьков, Э.М. Фазлулин](#) // [Известия Московского Государственного технического университета МАМИ](#). – Москва: МГТУ (МАМИ), 2014. – №5.1. – С. 170-176.
5. Казаков, Е.П. Сравнительные характеристики пакетов САПР: SolidWorks и T-FLEX CAD / Е.П. Казаков, Н.Ю. Богданова // [Молодой исследователь Дона](#). – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017. – №5. – С.50-57.

6. Пермяков, В.Н. Лабораторная проверка результатов, полученных в FlowVision / В.Н. Пермяков, М.В. Омельчук // Естественные и технические науки. – 2014. – №1. – С. 259-26.

7. Короткова, Ю.С. Анализ возможностей программного комплекса FlowVision / Ю.С. Короткова // Кристаллы творчества: материалы докладов студенческой академии наук: под общ. ред. Т.В. Семеновой. Т.1. – Тюмень: ТИУ, 2016. – С. 187-189.