

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНЫХ ЗОН ЗАСТОЯ НА НАРУЖНОЙ УСТАНОВКЕ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Тляшева Р.Р., Солодовников А.В.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

За последние 80 лет на нефтеперерабатывающих предприятиях произошел ряд аварий, характеризующие большими объемами выбросов опасного вещества и, как следствие, пожары, взрывы и токсичное заражение. Анализ аварий произошедших на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях [1] показал, что возникновение опасности первоначально связано с возникновением аварийной загазованности, на нее приходится 90 % всех аварий.

Прогнозирование зон застоя на наружных установках нефтеперерабатывающих предприятий с точки зрения безопасности необходимо, так как в зонах застоя возможно скопление опасного вещества. Под зонами застоя понимаются участки на территории нефтеперерабатывающих предприятий, где скорость ветра не превышает 0,5 м/с.

Среди существующих методов определения зон застоя применяют экспериментальные исследования с использованием датчиков контроля скорости ветра, аэродинамические трубы и объемные масштабные макеты технологических установок [2] или метод растворения индикаторного газа.

В настоящее время многие западные проектные и исследовательские организации в качестве альтернативы выше указанным методам определения зон застоя на промышленных объектах используют пакеты вычислительной гидродинамики (в английской транскрипции – Computational Fluid Dynamics или CFD) [3]. Использование CFD позволяет прогнозировать динамику развития зон застоя (первичной опасности) с учетом застройки объекта, рельефа местности, метеопараметров.

Для определения вероятных зон застоя на наружных установках предлагается использовать k - ϵ модель турбулентного течения вязкой жидкости с небольшими изменениями плотности при больших числах Рейнольдса. Графическая иллюстрация этапов прогнозирования зон застоя приведена на рисунке 1.

Опишем подробно назначение каждого этапа прогнозирования зон застоя с практической реализацией для типовой планировки атмосферной газофракционирующей установки (АГФУ) газо-каталитического производства нефтеперерабатывающего предприятия на территории в пригороде г. Уфы.

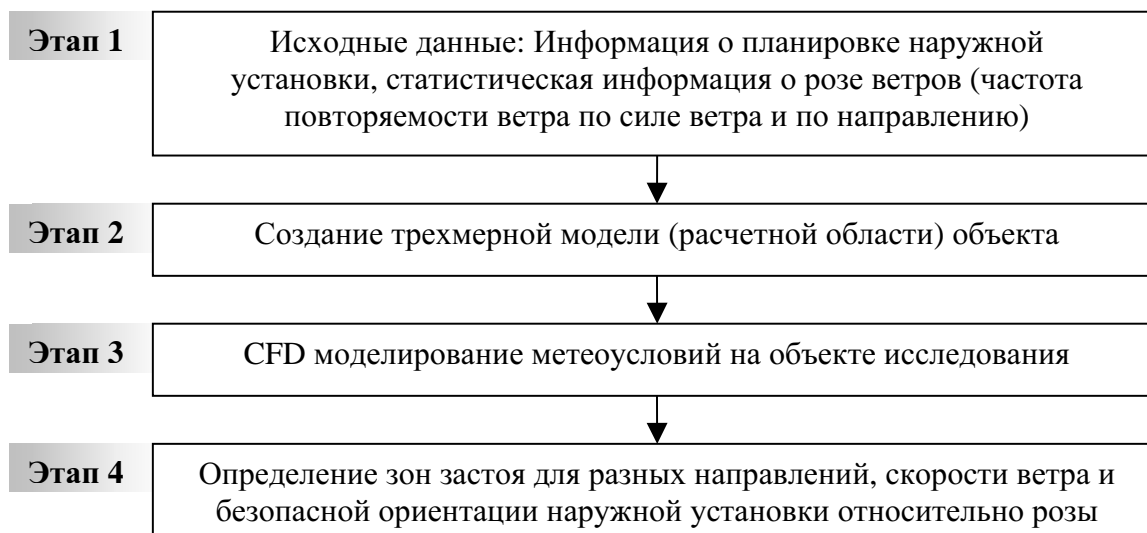


Рисунок 1. Графическая иллюстрация этапов прогнозирования зон застоя

Первый этап (подготовительный) - заключается в сборе сведений об объекте, для которого необходимо определить зоны застоя.

Исходными данными для расчетов являются:

- предназначение технологической установки, информация о планировке, перечень оборудования, зданий и сооружений их геометрические размеры;
- статистическая информация о розе ветров (частота повторяемости ветра по направлению) для окрестностей г. Уфы в годовом разрезе.

На АГФУ возможно возникновение опасности, по следующим причинам:

- высокая плотность размещения технологического оборудования;
- большое количество воспламеняющих веществ;
- наличие источников воспламенения (открытый огонь печей);

Задаемся предварительной ориентацией планировки зданий, сооружений и оборудования АГФУ относительно розы ветров (рисунок 2).

Статистические погодные данные для окрестностей города Уфы, собранные за 2004 г. и 2005 г., указывают на 3 преобладающих направления ветра (рисунок 3): южное, западное и северное. Эти направления будут использоваться как основные, при прогнозировании зон застоя на атмосферной газофракционирующей установке.

Учитывая метеорологическую информацию для окрестностей г. Уфы республики Башкортостан в годовом разрезе по повторяемости ветров и по их силе (рисунок 4), прогнозирование зон застоя будем проводить при скорости ветра соответствующей средней величине диапазонов силы ветра в 2 и 3 балла по шкале Бофорта.

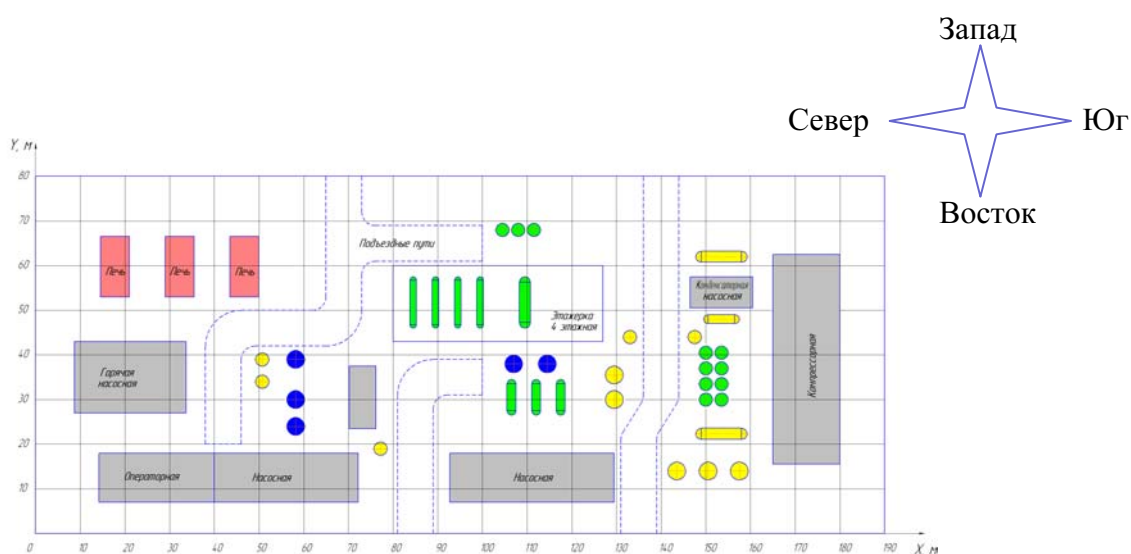


Рисунок 2. Планировка атмосферной газофракционирующей установки, её предварительная ориентация

Этап второй - построение геометрической основы задачи (параметрической трехмерной модели объекта). Геометрическая модель формируется с помощью внешних программ (так называемых геометрических препроцессоров) и затем импортируется в CFD пакет Flow Vision.

Параметрическая трехмерная модель типовой планировки АГФУ представлена на рисунке 5, на основе этой модели которой сгенерирована расчетная область (рисунок 6).

Этап третий - моделирование движения потоков ветра и определение застойных зон. Реализация данного этапа выполняется с использованием пакета численного моделирования FlowVision.

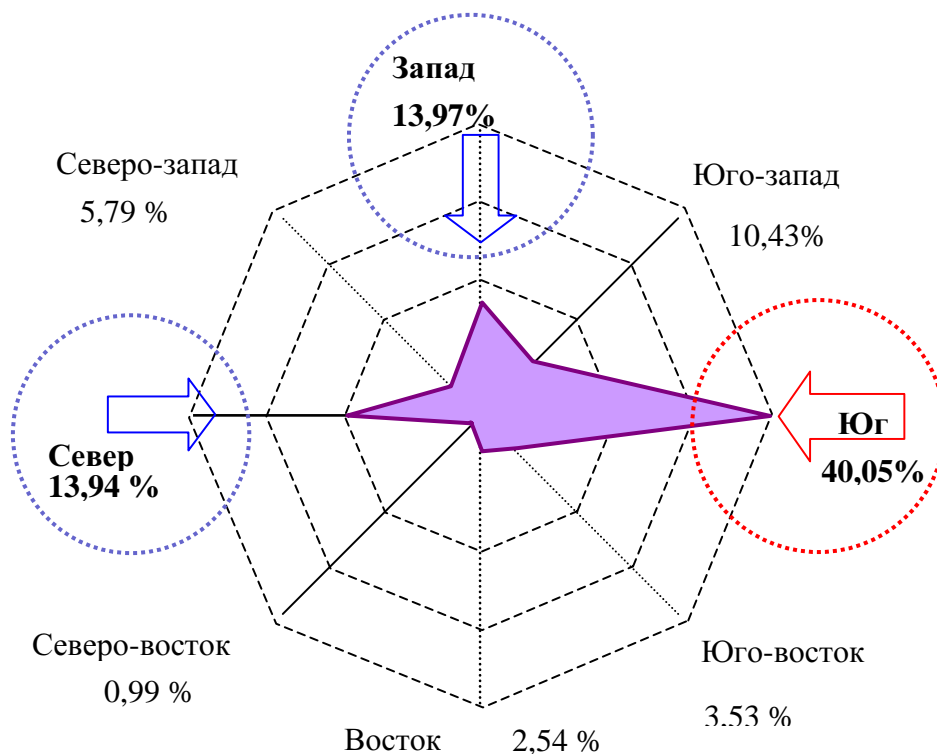


Рисунок 3. Частота повторяемости ветра по направлению для окрестностей города Уфы республики Башкортостан в годовом разрезе за 2004 и 2005 годы

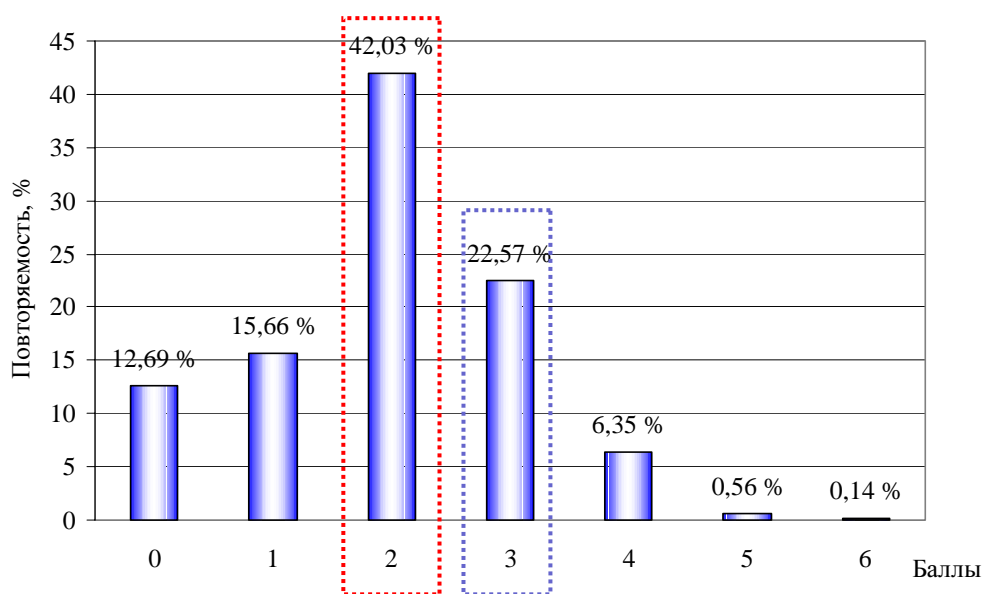


Рисунок 4. Повторяемость по силе ветра для окрестностей г. Уфы республики Башкортостан в годовом разрезе за 2004 и 2005 годы

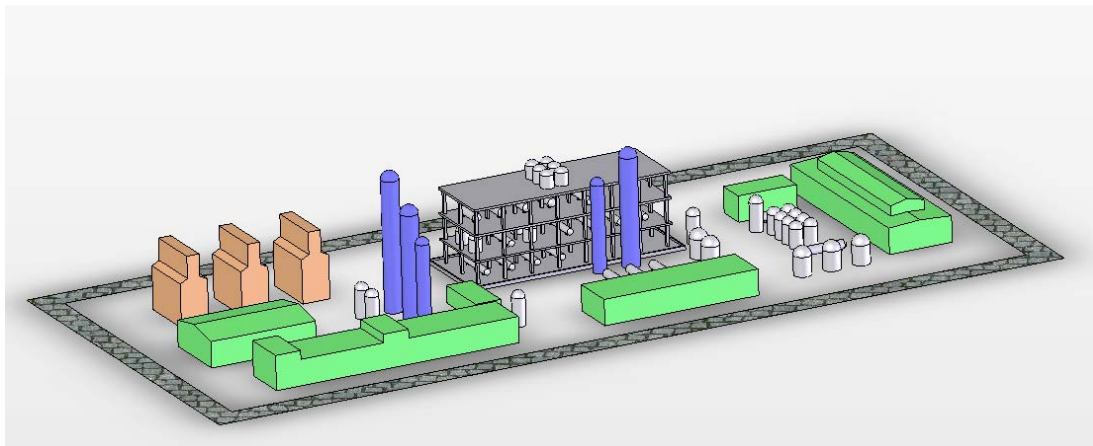


Рисунок 5. Параметрическая трехмерная модель АГФУ

Пакет FlowVision основан на конечно-объемном методе решения уравнений гидродинамики и использует прямоугольную адаптивную сетку с локальным измельчением. Для аппроксимации криволинейной геометрии расчетной области с повышенной точностью в пакете FlowVision используется технология подсеточного разрешения геометрии, такая технология позволяет решить проблему автоматической генерации сетки.

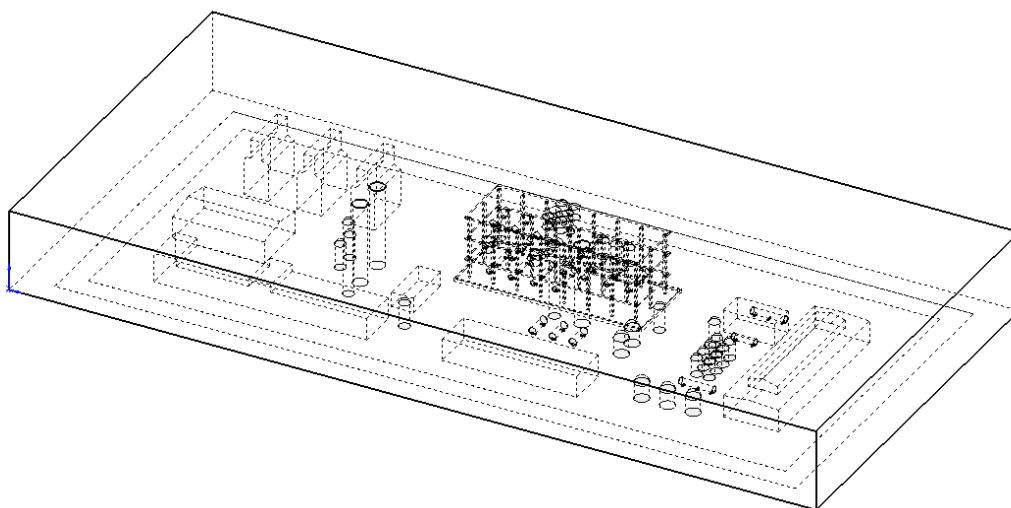


Рисунок 6. Расчетная область атмосферной газодифференцирующей установки

В качестве параметров метода численного моделирования вероятных зон застоя, используется стандартная k-ε модель турбулентности для течения газа, турбулентная вязкость в которой, выражена следующим образом (1)-(8)[3]:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (1)$$

где k - турбулентная энергия, м²/с;

ε - скорость диссипации турбулентной энергии, м²/с³;

ρ - плотность газа, кг/м³.

В данной модели турбулентного массопереноса используются уравнения Навье-Стокса (2):

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla((\mu_r + \mu_t)(\nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T)) + \left(1 - \frac{\rho_{\text{hyd}}}{\rho}\right) \mathbf{g} + \mathbf{B}; \quad (2)$$

$$\nabla \mathbf{V} = 0, \quad (3)$$

где \mathbf{V} – вектор скорости, м/с;

P – давление, Па;

\mathbf{g} – вектор силы тяжести Н/м²;

\mathbf{B} - коэффициент, учитывающий силы вращения,

μ_r – динамический коэффициент вязкость;

μ_t – турбулентная вязкость, кг/(м·с).

Если в модели присутствует теплоперенос, то его учитывают при помощи уравнения для энтальпии:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}h) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{C_p} + \mu_t \right) \nabla h \right). \quad (4)$$

Уравнение концентрации C

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}C) = \frac{1}{\rho} \nabla((D + \mu_t)\nabla C). \quad (5)$$

Значения k и ε определяются из уравнения для турбулентной энергии (6) и из уравнения для скорости диссипации турбулентной энергии (7):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}k) = \frac{1}{\rho} \nabla((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})\nabla k) + \frac{G}{\rho} - \varepsilon; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}\varepsilon) = \frac{1}{\rho} \nabla((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})\nabla \varepsilon) + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 \frac{G}{\rho} - C_2 \varepsilon), \quad (7)$$

где G :

$$G = \mu_t \frac{\partial V_i}{\partial x_j} (\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}). \quad (8)$$

Для рассматриваемого случая значения параметров k - ε модели принимаем: $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$; $C_\mu = 0,09$; $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$ согласно рекомендациям [3].

Учитывая, что реализация задач движения воздуха существенно зависит от аэродинамики в выработанном пространстве. В модели сделано ряд предположений, которые физически соответствуют условиям рассматриваемой задачи и позволяют упростить её физико-математическую постановку, а именно расчет движения потока воздуха будет рассматриваться без учета процессов теплообмена (с поверхностью земли и со стенками оборудования) и химических реакций.

Для улучшения сходимости решения задачи следует применить разностную схему первого порядка, а полученные результаты использовать в качестве первого приближения при выборе схемы более высокого порядка.

В качестве начальных условий моделирования естественного движения ветра на наружной установке, принимается: $t=0$ °С (или задать значение температуры окружающей среды, при которых необходимо выполнить моделирование), $u=v=w=0$, $C=0\%$. Поток обтекающий установку задается степенным профилем (9) изменения скорости ветра по высоте [4, 5]. При этом сама установка каждый раз ориентируется перпендикулярно направлению ветра, скорость ветра принимаем равной среднему значению интервала силы ветра по шкале Бофорта (таблица 1) [8].

По боковым поверхностям расчетной области задаются симметричные граничные условия, а в приземном слое предполагается непроницаемость земной поверхности.

$$v_h = v_0 \cdot (h/h_0)^\alpha \quad (9)$$

где v_h – скорость ветра, м/с, на высоте h , м;

v_0 – скорость ветра, м/с, измеренная на высоте h_0 , м (как правило, скорости ветра измеряются на высоте 10÷15 м, и в этом случае $h_0 = 10÷15$ м);

α – показатель степени, зависящий от типа местности [6] и устанавливаемый экспериментально, Саймиу и Сканлон [7] приводят значения α для центров крупных городов $\alpha=0,33$, для условий пригорода $\alpha=0,22$, для открытой местности $\alpha=0,14$.

Таблица 1

Характеристики ветров

Ветер	Баллы	V, м/с	Ветер	Баллы	V, м/с
Штиль	0	0...0,5	Очень крепкий	8	15,3...18,2
Тихий	1	0,6...1,7			
Легкий	2	1,8...3,3	Шторм	9	18,3...21,5
Слабый	3	3,4...5,2	Сильный шторм	10	21,6...25,1
Умеренный	4	5,3...7,4			
Свежий	5	7,5...9,8	Жестокий шторм	11	25,2...29,0
Сильный	6	9,9...12,4			
Крепкий	7	12,5...15,2	Ураган	12	более 30

Этап четвертый - Определение зон застоя для разных направлений и скорости ветра, определение рациональной ориентации наружной установки. Данный этап реализуется с использованием постпроцессора пакета FlowVision, который служит для вывода и представления, прежде всего визуализации полученных в результате расчетов данных.

В результате проведенных расчетов с использованием пакета FlowVision были рассчитаны линии токов потока воздуха для силы ветра равной 2 и 3 балла. На рисунке 7 представлены распределения линий потоков воздуха в расчетной области при силе ветра 2 балла. Расчеты метеопараметров поля скоростей ветра на наружной площадке показали весьма сложную картину, изобилующую циркуляционными зонами, сменами направления течения и другими особенностями.

В FlowVision используется большой набор методов визуализации, которые классифицируются по типу представляемых математических величин: скалярная величина, скалярное поле, векторное поле (скорости), а также по используемой

геометрии (трехмерной или двумерной). Важно, что данные могут выводиться на любом этапе расчета, и это позволяет отслеживать динамику моделируемого процесса.

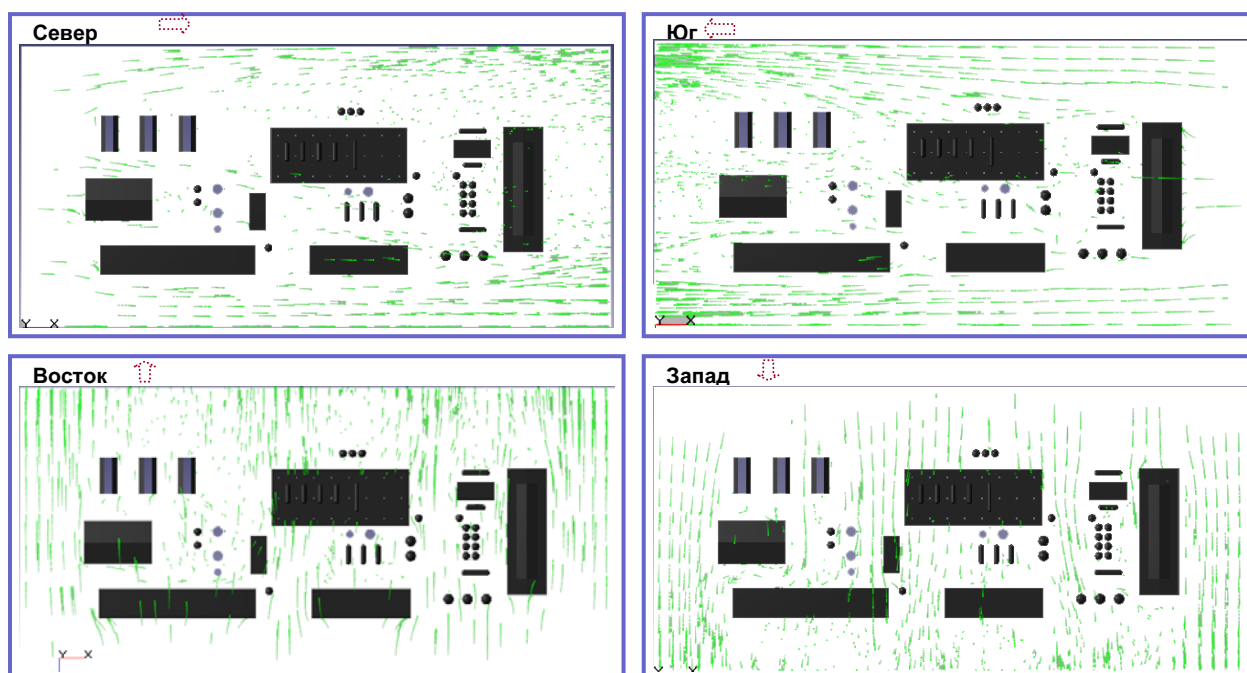


Рисунок 7. Линии тока ветра в рабочей зоне атмосферной газофракционирующей установки при силе ветра равной 2 баллам

Использование численного пакета при решении задачи прогнозирования вероятных зон застоя позволяет рассчитать коэффициент зоны застоя. Данный коэффициент характеризует о наличии зон застоя при заданной ориентации ветра на наружной установке. Чем выше значения коэффициента зоны застоя при данном направлении и скорости ветра, тем больше вероятность возникновения загазованности.

Коэффициент зон застоя может быть объемный и поверхностный. Объемный коэффициент рабочей зоны застоя – это отношение объема застоя в рабочей зоне к общему объему рабочей зоны минус объем оборудования, зданий и сооружений находящего в ней, формула (10).

$$K_{з\text{с}}^v = \frac{V_{зас}}{V_{общ} - V_{об}} \quad (10)$$

где $V_{зас}$ - значения объема застоя в рабочей зоне (определяется с использованием CFD пакета), м^3 ;

$V_{общ}$ - общий объем рабочей зоны, м^3 ,

$V_{об}$ - объем оборудования, зданий и сооружений находящего в рабочей зоне, м^3 .

Рабочей зоной называется пространство высотой до 2 метров над уровнем пола или площадки, на которых находятся места постоянного или временного пребывания работающих в процессе трудовой деятельности

Поверхностный коэффициент зоны застоя – это отношение площади зоны застоя на высоте до 2,8 м от нулевой отметки технологической площадке к общей площади зоны минус площадь оборудования находящего в ней.

$$K_{зс}^V = \frac{S_{зас}}{S_{общ} - S_{об}} \quad (11)$$

где $S_{зас}$ - значения площадь застоя в рабочей зоне (определяется с использованием CFD пакета), м³;

$S_{общ}$ - общая площадь рабочей зоны, м³,

$S_{об}$ - площадь оборудования, зданий и сооружений находящего, м³.

Расчет поверхностного коэффициента зоны застоя рекомендуется выполнять на отметках 1, 2 и 2,8 м.

Определив коэффициенты зоны застоя для основных направлений ветра можно определить рациональную ориентацию наружной установки (зданий и сооружений) с учетом застройки промышленного объекта и господствующих ветров. Под рациональной ориентацией понимается исключение и/или минимизация накопления опасных веществ на протяжении эксплуатации опасного объекта.

Для рациональной ориентации объекта необходимо следовать правилу: Меньшему значению коэффициента зоны застоя, должно соответствовать направление ветра с большей частотой повторяемости. Ориентация установок по предложенному правилу позволит повысить безопасность за счет наилучшего расположения установки относительно господствующих ветров.

Расчет вероятных зон застоя для АГФУ при силе ветра 2 балла приведен на рисунке 8, а при силе ветра 3 балла на рисунке 9.

Результаты расчета коэффициентов зон застоя для предлагаемой ориентации установки относительно розы ветров показали, что установка имеет не самое рациональное расположение относительно господствующих ветров.

Значения рассчитанных коэффициентов зон застоя для разной силы ветра в 2 и 3 балла приведены на графиках (рисунки 10, 11).



Рисунок 8. Вероятные зоны застоя на отметке $H=2$ м при силе 2 балла (красный цвет показывает вероятные зоны застоя, градиент от красного к синему отражает зону перехода повышения скорости ветра на данной плоскости)

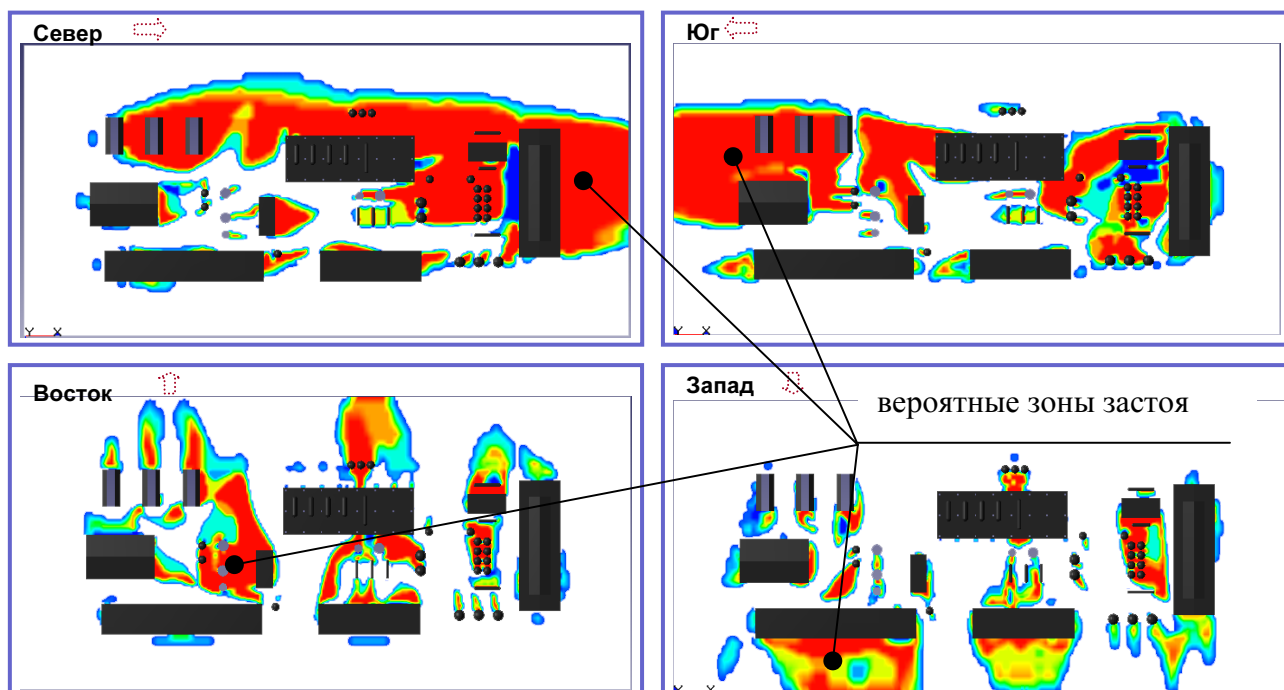


Рисунок 9. Вероятные зоны застоя на отметке $H=2$ м при силе 3 балла (красный цвет показывает вероятные зоны застоя, градиент от красного к синему отражает зону перехода повышения скорости ветра на данной плоскости)

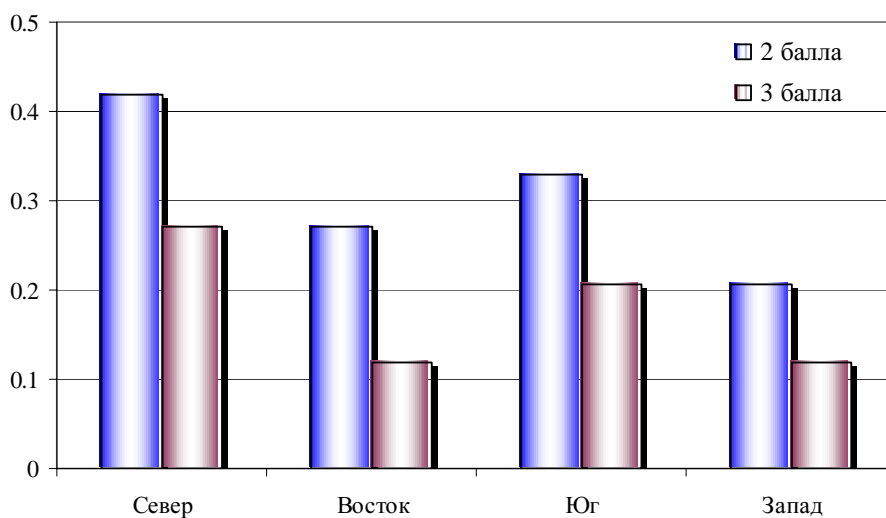


Рисунок 10. Поверхностный коэффициент зоны застоя на отметке $h=2$ м для силы ветра 2 и 3 балла по шкале Бофорта

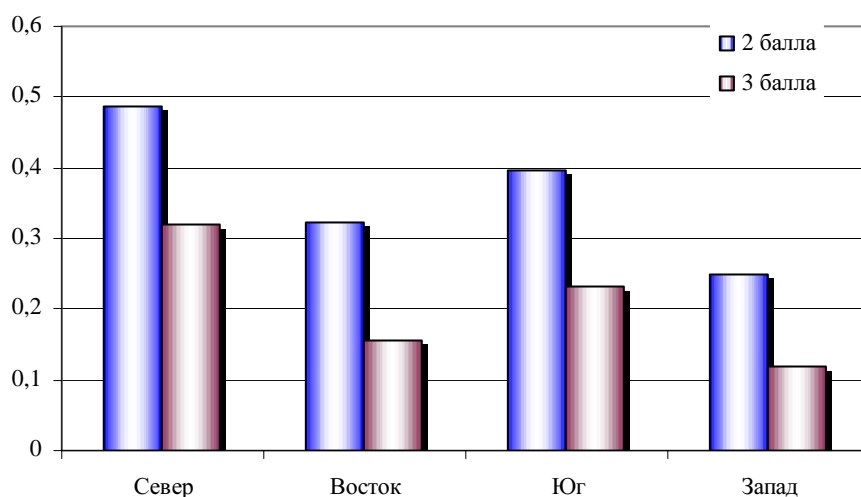


Рисунок 11. Объемный коэффициент рабочей зоны застоя для силы ветра 2 и 3 балла по шкале Бофорта

На основе имеющей метеорологической информации для окрестностей города Уфы республики Башкортостан в годовом разрезе по повторяемости ветров и по их силе и по рассчитанным коэффициентам зоны застоя, следуя предложенному правилу рациональной ориентации, типовую планировку АГФУ следует ориентировать относительно господствующих ветров согласно рисунку 12.

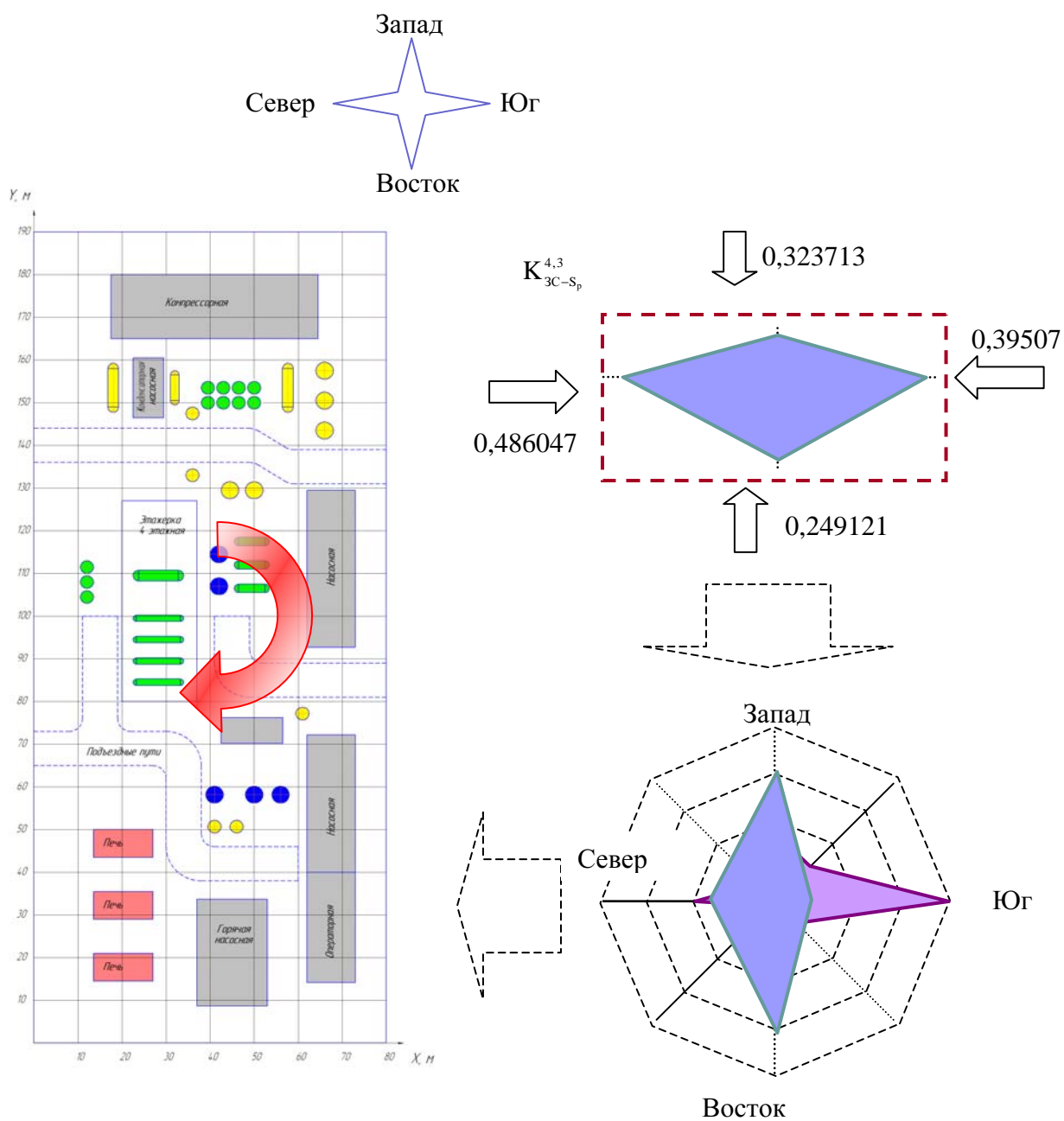


Рисунок 12. Рациональная ориентация типовой планировки атмосферной газофракционирующей установки

Учитывая, что зоны застоя для основных направлений ветра могут частично совпадать вследствие высокой насыщенности установок нефтеперерабатывающих предприятий, предлагается ввести классификацию

территории по возникновению зон застоя. Предлагаемая классификация участков территории наружных установок приведена в таблице 2.

Таблица 2

Классификация участков территории наружных установок

Зона	Признак зоны	Описание зоны
А	Мертвая зона	Это территория наружной установки, в которой имеем зону застоя при любом направлении ветра
Б	Плохо проветриваемая зона	Это территория наружной установки, в которой имеем зону застоя образованная трех наибольших зон застоя
В	Средне проветриваемая зона	Это территория наружной установки, в которой имеем зону застоя образованная двух наибольших зон застоя
Г	Слабо проветриваемая зона	Это территория зоны застоя образованная при одном направлении ветра
Д	Проветриваемая зона	Территория установки, в которой отсутствуют зоны застоя при любом направлении ветра

Предложенная классификация участков территории наружных установок представленная в таблице 2, может быть использована при определении очередности покрытия территории наружной установки датчиками газоанализаторами.

Покрытие территории следует производить в соответствие со схемой представленной на рисунке 13. В первую очередь датчики газоанализаторов необходимо размещать в мертвой зоне, затем в плохо проветриваемой зоне и т.д.

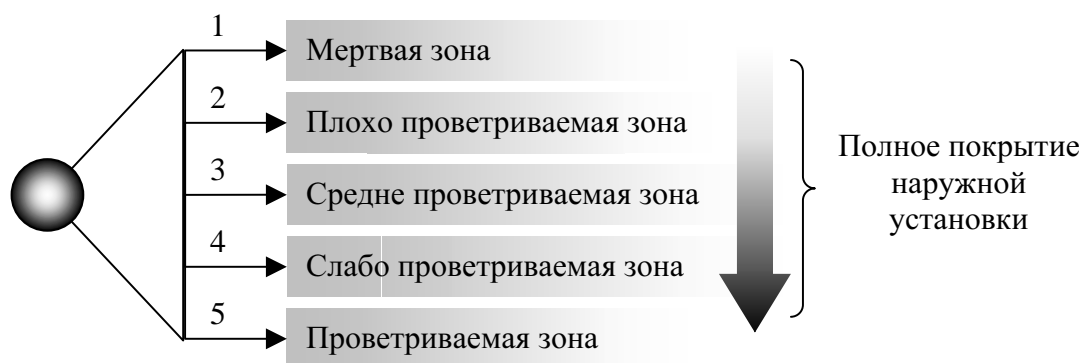


Рисунок 13. Схема очередности покрытия датчиками газоанализаторами территории наружной установки

Выводы

Использование новейших компьютерных технологий позволяют кардинально сократить сроки безопасного проектирования опасных производственных объектов, и уже на этапе проектирования выполнить прогнозирование вероятных зон застоя (первичной опасности).

Впервые, на примере типовой планировки АГФУ определены вероятные зоны застоя при скорости ветра соответствующей силе в 2 и 3 балла по шкале Бофорта.

Впервые, предложено классифицировать участки территории наружных установок нефтеперерабатывающих предприятий по возникновению на них застойных зон относительно основных направлений ветра. Данная классификация может быть использована при определении очередности покрытия территории датчиками газоанализаторами.

Впервые, введены объемный (поверхностный) коэффициенты зон застоя. Данные коэффициенты могут быть использованы для рационального размещения оборудования и промышленных объектов с учетом господствующих ветров. На примере типовой планировки АГФУ были рассчитаны движение потоков ветра с учетом застройки и определена рациональная ориентация установки при её размещении в пригороде г. Уфы.

Литература

1. Маршалл В. Основные опасности химических производств: Пер. с англ.// Под ред. Б. Б. Чайванова, А. Н. Черноплекова. М.: Мир, 1989. – 672 с.
2. Saunders C. J., Ivings M. J. Natural ventilation of offshore modules / Research report № 402. HSE, 2005.
3. Система моделирования движения жидкости и газа. Руководство пользователя FlowVision. – М. 2005. – 305 с.
4. Защита атмосферы от промышленных загрязнений Справочник. Изд.: В 2-х ч. Ч.2 Пер с английского. /Под редакцией Калверта С., Инглунда Г.М. М.: Металлургия, 1988. – 712 с.

5. Ю.А.Табунщиков, Н.В. Шилкин Аэродинамика высотных зданий // АВОК 2004. - №8 - С.14-22
6. ASHRAE Handbook. Fundamentals. SI Edition. 1997.
7. Саймиу Э., Сканлон Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. М., 1984. – 345с.
8. Экология: Учебник /Потапов А.Д. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2004. – 528 с.