

*Хафизов И.Ф.,
доктор технических наук, профессор
кафедры Пожарная и промышленная безопасность»
«Уфимский государственный нефтяной технический университет»
Россия, г. Уфа
Уразбаева И.И.,
студент
2 курс, факультет «Горно-нефтяной факультет»
Уфимский государственный нефтяной технический университет»
Россия, г. Уфа*

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ КОЛОННЫ ВЫДЕЛЕНИЯ МЕТАНА

***Аннотация:** В статье представлены результаты прогнозирования аварийных ситуаций при разгерметизации колонны выделения метана. Проанализированы свойства метана, конструкция оборудования и нормативные требования. Выявлены причины разгерметизации, систематизированы четыре типовых сценария, разработана математическая модель истечения метана. Предложен пятиэтапный алгоритм раннего обнаружения дефектов и комплекс мер защиты. Методика позволяет выявлять дефекты за 5 – 30 минут до критических событий.*

***Ключевые слова:** колонна выделения метана, деметанизатор, разгерметизация, прогнозирование аварий, истечение метана, криогенные температуры, математическое моделирование, промышленная безопасность.*

***Annotation:** The article presents the results of predicting emergency situations during depressurization of a methane separation column. The properties*

of methane, equipment design, and regulatory requirements are analyzed. The causes of depressurization are identified, four typical scenarios are systematized, and a mathematical model of methane outflow is developed. A five-stage early defect detection algorithm and a set of protection measures are proposed. The methodology allows detecting defects 5–30 minutes before critical events.

Key words: *methane separation column, demethanizer, depressurization, accident prediction, methane release, cryogenic temperatures, mathematical modeling, industrial safety.*

Колонна выделения метана (деметанизатор) является ключевым элементом технологической схемы газоперерабатывающих и нефтехимических производств. Она эксплуатируется при давлениях до 7,0 МПа и криогенных температурах от $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, что создаёт повышенные риски аварийных ситуаций.

Метан (CH_4), обращающийся, в колонне, обладает высокой взрывопожароопасностью: нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПРП) составляет 5 % об., верхний (ВКПРП) – 15 % об. При попадании в этот диапазон любая искра способна вызвать воспламенение с переходом в детонацию. Кроме того, метан токсичен: предельно допустимая концентрация (ПДК) в воздухе рабочей зоны равна 7000 мг/м^3 , при её превышении возникает риск кислородного голодания и удушья. Ключевая особенность метана, определяющая тяжесть аварий при разгерметизации, – объёмное расширение при фазовом переходе из жидкого состояния в газообразное: один литр жидкого метана при вскипании образует около 600 литров газа. Это обуславливает взрывной характер утечки, формирование ударной волны и обширной зоны загазованности.

Деметанизатор представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат высотой 50 – 90 метров и диаметром 3 – 8 метров, оснащённый 40 –

80 ректификационными тарелками (ситчатыми, клапанными или насадочными). Внутри колонны размещены переливные устройства, распределители жидкости, штуцеры для ввода сырья и вывода продуктов, люки для обслуживания, фланцевые соединения и предохранительные клапаны. Контрольно-измерительные приборы включают датчики давления на разных отметках, термопары на тарелках, уровнемеры и расходомеры. Основные материалы изготовления – хладостойкие стали, сохраняющие вязкость и пластичность при криогенных температурах.

Согласно Федеральному закону № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», колонна выделения метана относится к опасным производственным объектам (ОПО) I–II класса опасности, что требует обязательной регистрации в государственном реестре, получения лицензии на эксплуатацию, аттестации персонала, разработки декларации промышленной безопасности и страхования гражданской ответственности.

Основные причины разгерметизации дедметанизатора можно разделить на несколько групп.

В первую очередь это коррозионные процессы, которые включают общую равномерную коррозию (постепенное утонение стенки), локальную питтинговую коррозию (образование точечных углублений – концентраторов напряжений), межкристаллитную коррозию (разрушение по границам зёрен металла), коррозионное растрескивание под напряжением и водородное охрупчивание (потеря пластичности при проникновении водорода в кристаллическую решётку).

Далее это усталостные явления, которые возникают из-за циклических нагрузок при пусках и остановках, термических градиентов по высоте колонны и вибраций от работающего насосно-компрессорного оборудования.

В-третьих, это дефекты изготовления и монтажа (непровары сварных швов, поры, остаточные напряжения, несоосность фланцев), которые могут

закладываться на этапе строительства и проявляться в процессе эксплуатации.

Также это нарушения технологического режима, такие как гидроудары, скачки давления и замерзание влаги при низких температурах, которые способны инициировать аварийные ситуации.

И наконец, отказы автоматики (предохранительных клапанов, регуляторов давления, датчиков) и ошибки персонала (нарушение регламентов, неправильная регулировка арматуры), которые также вносят значительный вклад в вероятность разгерметизации.

Но особую опасность представляют комбинированные механизмы: коррозия + усталость (коррозионная среда снижает предел выносливости металла), гидроудар + коррозия (пиковая нагрузка на ослабленные участки), низкие температуры + дефекты материала (хрупкое разрушение) и ошибки персонала + отказы автоматики (многократное повышение вероятности аварии).

Выделены четыре сценария: микротрещины (0,1–1 мм) – медленное истечение; средние отверстия (1–50 мм) – двухфазное истечение, ледяные пробки, гидроудары; крупные разрывы (>50 мм) – взрывное вскипание, ударная волна (до 56 кПа), тепловое излучение (до 39 кВт/м²), зона загазованности до 500 м; разрушение фланцев – локальный выброс с риском воспламенения.

Для количественной оценки используется термодинамическая модель истечения $G = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2\rho\Delta P}$, где G – массовый расход, C_d – коэффициент расхода (0,6–0,8), A – площадь отверстия.

Для двухфазных потоков применяется модель гомогенного равновесия (НЕМ). Ключевые параметры анализа: массовая доля пара (скорость вскипания), скорость звука в смеси (динамика ударных волн), плотность и энтальпия потока.

Предложен пятиэтапный алгоритм прогнозирования:

1) мониторинг давления, температуры, акустической эмиссии, вибрации, газоанализа (интервал 1 – 5 с);

2) идентификация дефектов по отклонениям (скачки $> 0,1$ бар/мин, $\Delta T = 5 - 15$ К, вибрация $+30 - +50$ %);

3) расчёт динамики аварии;

4) оценка последствий;

5) формирование предупреждений (жёлтый/красный уровни).

Критерии раннего обнаружения: акустика (20 – 80 кГц – микротрещины, 1 – 10 кГц – крупные разрывы), температурные аномалии, колебания давления $>0,5$ бар, рост вибрации.

Комплексная защита включает активные системы (быстродействующие клапаны $<0,5$ с, аварийная вентиляция), пассивные (двойные стенки, вакуумная термоизоляция) и организационные меры (неразрушающий контроль, обучение персонала, планы локализации аварий, учения).

Проектные решения – хладостойкие материалы, двойные стенки с контролем давления, резервирование клапанов и датчиков.

Разработанная методика позволяет выявлять дефекты за 5 – 30 минут до критических событий и соответствует требованиям ФЗ № 116-ФЗ.

Практическая значимость заключается в повышении надёжности и безопасности эксплуатации деметанизаторов на газоперерабатывающих предприятиях.

Использованные источники:

1 Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (ред. от 08.08.2024).

2 ГОСТ Р 12.3.047-2012. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2019.

3 Белов П.Г. Безопасность жизнедеятельности: теория и практика. – М.: Юрайт, 2023.

4 Корольченко А.Я. Процессы горения и взрыва. – М.: Пожнаука, 2021.

5 Руководство по оценке рисков аварийных разгерметизаций и выбросов на объектах с применением сжиженных природного газа, гелия и других криопродуктов: СТО Газпром 2-3.2-1128-2020. – Введ. 2020-12-01. – М.: ООО "Газпром ВНИИГАЗ", 2020. – 89 с.

6 Методика расчёта зон поражения при авариях на опасных производственных объектах / НТЦ «Промышленная безопасность». – М., 2021.

7 Петров А.И. Современные методы оценки риска на опасных производственных объектах // Безопасность труда в промышленности. – 2023. – № 5. – С. 34 – 41.

8 РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. – М.: Госгортехнадзор России, 2001.