

УДК 621.59, УДК 614.83

*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 ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ В
КРИОГЕННЫХ СИСТЕМАХ СЖИЖЕНИЯ ГЕЛИЯ**

***Аннотация:** В статье анализируются физические основы и потенциальные последствия аварийных режимов, возникающих вследствие разгерметизации теплообменных аппаратов (ТОА) в системах сжижения гелия. Рассмотрены характерные сценарии развития аварий, связанные с быстрыми термодинамическими и гидродинамическими процессами. Цель работы – систематизация опасностей и обоснование подхода к прогнозированию критических нагрузок на основе анализа балансов энергии и импульса, что необходимо для разработки эффективных инженерных мер защиты.*

***Ключевые слова:** криогенные системы, гелиевый ожижитель, разгерметизация, аварийный процесс, термогидродинамика, безопасность, инженерный анализ.*

Annotation: *The article analyzes the physical foundations and potential consequences of emergency modes arising from depressurization of heat exchangers (TOA) in helium liquefaction systems. Typical accident development scenarios associated with rapid thermodynamic and hydrodynamic processes are considered. Purpose of work - systematization of hazards and justification of approach to the prediction of critical loads based on the analysis of energy and impulse balances, which is necessary for the development of effective engineering protection measures.*

Key words: *cryogenic systems, helium liquefier, depressurization, emergency process, thermohydrodynamics, safety, engineering analysis.*

Надежность теплообменных аппаратов в замкнутых циклах сжижения гелия (например, в цикле Коллинза) является определяющим фактором безопасности. Нарушение герметичности ТОА, особенно на участках высокого давления, инициирует сложный каскад взаимосвязанных процессов: нестационарное истечение гелия, интенсивное смешение потоков с различными термодинамическими параметрами, быстрое охлаждение конструкционных материалов. Эти процессы создают риски хрупкого разрушения, механических повреждений от перепада давлений и выхода системы из-под контроля. Прогнозирование таких ситуаций требует качественного и количественного анализа физической сущности явлений.

Анализ опасностей и характерных сценариев. При разгерметизации ТОА ключевыми являются два взаимосвязанных процесса:

1) Динамическое истечение газа. Резкое вскрытие контура приводит к адиабатическому истечению гелия в окружающую среду или в смежный контур аппарата. Скорость истечения, массовый расход и конечное давление определяются начальными параметрами и площадью эквивалентного проходного сечения. При истечении в зону низкого давления возможен переход в сверхзвуковой режим с образованием ударных структур.

2) Интенсивное тепло- и массообмен. Поступление холодного гелия из поврежденного контура в соседние полости вызывает их быстрое заполнение и охлаждение. Главную опасность представляет резкое охлаждение элементов конструкции (трубных решеток, корпусов) до температур, приближающихся к температуре сжижения (4,2 К), что может привести к хладноломкости материалов. Одновременно рост давления в смежном контуре может превысить расчетные пределы.

Прогнозирование последствий основано на применении законов сохранения (массы, энергии, импульса) к контрольным объемам системы в нестационарной постановке. Аналитический подход включает:

1) оценку максимально возможного массового расхода при истечении через предполагаемый дефект с использованием соотношений для адиабатического потока;

2) расчет адиабатической температуры торможения потока для оценки предельного охлаждения конструкций;

3) анализ изменения состояния в смежных объемах системы с использованием упрощенных уравнений неразрывности и энергии, позволяющих оценить характерное время нарастания давления.

4) оценку термических напряжений в стенках аппарата на основе решения уравнения теплопроводности для ступенчатого изменения температуры среды;

5) обсуждение результатов анализа.

Качественный и упрощенный количественный анализ позволяет выявить наиболее опасные сценарии.

Максимальные динамические нагрузки возникают при разгерметизации "теплого" конца контура высокого давления, где запасенная энтальпия газа наибольшая.

Критической зоной является контур низкого давления, который может быть переполнен и механически разрушен поступающим из высоконапорной части газом.

Скорость охлаждения металла может достигать сотен кельвин в секунду, что требует проверки материалов на ударную вязкость при криогенных температурах.

Инженерные выводы и меры защиты. На основе прогнозного анализа формулируются практические требования к системе безопасности.

1) Обоснование мест установки и производительности предохранительных клапанов и разрывных мембран на каждом изолированном контуре ТОВА.

2) Необходимость скоростных отсекающих устройств (клапанов с малым временем срабатывания) на линиях высокого давления.

3) Требования к материалам и конструктивному исполнению ТОВА, учитывающие возможность локального сверхбыстрого охлаждения.

4) Разработка регламентов аварийной остановки, минимизирующих выброс криогенного продукта.

Прогнозирование аварий при разгерметизации теплообменного оборудования криогенных гелиевых систем возможно на основе детального физико-математического анализа процессов нестационарного истечения, смешения и теплообмена. Такой анализ, даже без проведения полного компьютерного моделирования, позволяет количественно оценить масштаб опасностей и является строгой основой для проектирования барьеров безопасности. Это обеспечивает создание надежных систем, способных локализовать или смягчить последствия гипотетической разгерметизации, защищая как оборудование, так и персонал.

Использованные источники:

1 Григорьев, В. А. Современные методы расчета аварийного истечения криогенных продуктов при разгерметизации оборудования / В.А. Григорьев, С.Ю. Венгер, А.Л. Зуев // Научное приборостроение. – 2021. – Т. 31, № 4. – С. 68-77.

2 Калинин, А. В. Оценка остаточного ресурса и вероятности хрупкого разрушения сталей аустенитного класса в криогенной аппаратуре после длительной эксплуатации / А.В. Калинин, А.И. Есин, А.С. Руднев // Вопросы материаловедения. – 2023. – № 1 (113). – С. 118-130.

3 Семенов, К. К. Численно-аналитическая модель нестационарного теплообмена при аварийном охлаждении элементов криогенных систем / К.К. Семенов, И.А. Кузнецов // Холодильная техника. – 2022. – № 7. – С. 32–38.

4 Петров, А. Н. Анализ причин отказов пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов в составе воздухоразделительных установок и методы повышения их надежности / А.Н. Петров, Т.П. Борисова, Д.М. Иванов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2020. – № 5. – С. 22–26.

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.