

Система безопасности.

Практическая реализация методологии оценки безопасности и выработки предложений по совершенствованию системы безопасности при эксплуатации оборудования нефтехимических производств.

Ибадулаев В.А., Карюкин В.В., Космачев В.П., Лезин Ю.С. (ВМА),
Степанов И.В. (СпбГЭТУ «ЛЭТИ»),
Павлов П.М., Филатов В.С. (ООО «КИНЕФ»),
Кузнецова Л.А., Ермоленко А.Д., Маркелова В.А. (ОАО «Ленгипронефтехим»),
Можаев А.С. (ОАО «СПИК СЗМА»)

Аннотация: рассматриваются вопросы моделирования процессов функционирования сложных организационно-технических систем в задачах оценки последствий аварий на нефтеперерабатывающих производствах. Описана модель «надежности» и модель «безопасности» блока стабилизации бензина установки ЭЛОУ-АТ-6.

Построение модели процесса безопасного функционирования осуществлено для блока стабилизации бензина установки ЭЛОУ-АТ-6 ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез». Установка предназначена для первичной переработки нефти с разделением ее на фракции и выделением стабильного бензина.

Основываясь на результатах исследований, проведенных ранее, для оценки безопасности эксплуатации и построения модели безопасности был выбран блок стабилизации бензина установки ЭЛОУ-АТ-6. Согласно данным, приведенным в декларации промышленной безопасности, наибольшую потенциальную опасность для данного блока представляет выход рабочего давления за критическое значение (17 кгс/см^2), на которое рассчитана емкость Е-2. При таком росте давления возможна деформация емкости с последующим разрушением. В результате в окружающую среду может поступить до 12 т бензина и углеводородных газов (до 2,9 т сжиженного газа, 0,1 т в газовой фазе и 8,7 т конденсата парогазовой смеси).

Проведенный анализ основных функций и взаимосвязей в работе элементов системы автоматического регулирования, контроля, сигнализации и противоаварийной защиты, предназначенных для предотвращения роста давления в контуре колонны стабилизации и рефлюксной емкости Е-2 выше предельного 17 кг/см^2 , позволил нам с помощью общего логико-вероятностного метода (ОЛВМ) анализа построить модель безопасной эксплуатации блока.

Результаты расчетов безопасной эксплуатации блока позволили выйти на такие показатели безопасности, как вероятность безотказной работы системы безопасности по предотвращению роста давления ($P(\text{год})=0,999998$), вероятность отказа системы безопасности ($Q(\text{год})=2.4 \cdot 10^{-6}$), значимость каждого отдельного элемента в системе безопасности, надежностный потенциал элемента в виде «положительного вклада», а также коэффициенты «снижения и повышения безопасности» для наиболее значимых элементов системы. В конечном счете, разработанная модель позволила не только оценить уровень безопасности системы в целом, но и исследовать влияние структурно-функциональных изменений на систему безопасности и оценить эффективность планируемых организационно-технических мероприятий по совершенствованию безопасности.

В процессе построения модели безопасности были приняты определенные допущения. В частности, вероятность инициирующего события, приводящего к отклонению давления в системе от нормы, мы принимали за единицу. По сути дела, считая, что система предотвращения роста давления функционирует постоянно.

Соответственно, при ее отказе давление в контуре с вероятностью 1 поднимется до запредельной величины (свыше 17 кг/см²) и произойдет разгерметизация емкости Е-2.

Дальнейшие исследования данной системы показали, что при оценке степени ее потенциальной опасности не только можно, но и необходимо учитывать и внутренние процессы, протекающие в блоке в процессе эксплуатации установки.

Анализ тепломассообменных процессов, протекающих в колонне К-8 при стабилизации бензина, показал, что при нагревании исходной фракции бензина НК-180°С происходит выделение пропан-бутановой газовой смеси, которая и создает давление в системе. Далее газовая фракция охлаждается в системе водяных конденсаторов и собирается в емкости Е-2 в виде сжиженного газа (рефлюкса).

Общее давление в контуре колонны К-8 и рефлюксной емкости Е-2 будет зависеть от состава бензина, физико-химических свойств пропан-бутановой смеси и давления насыщенного пара газовой смеси. Для равновесных условий эти характеристики приведены в табл. 1.

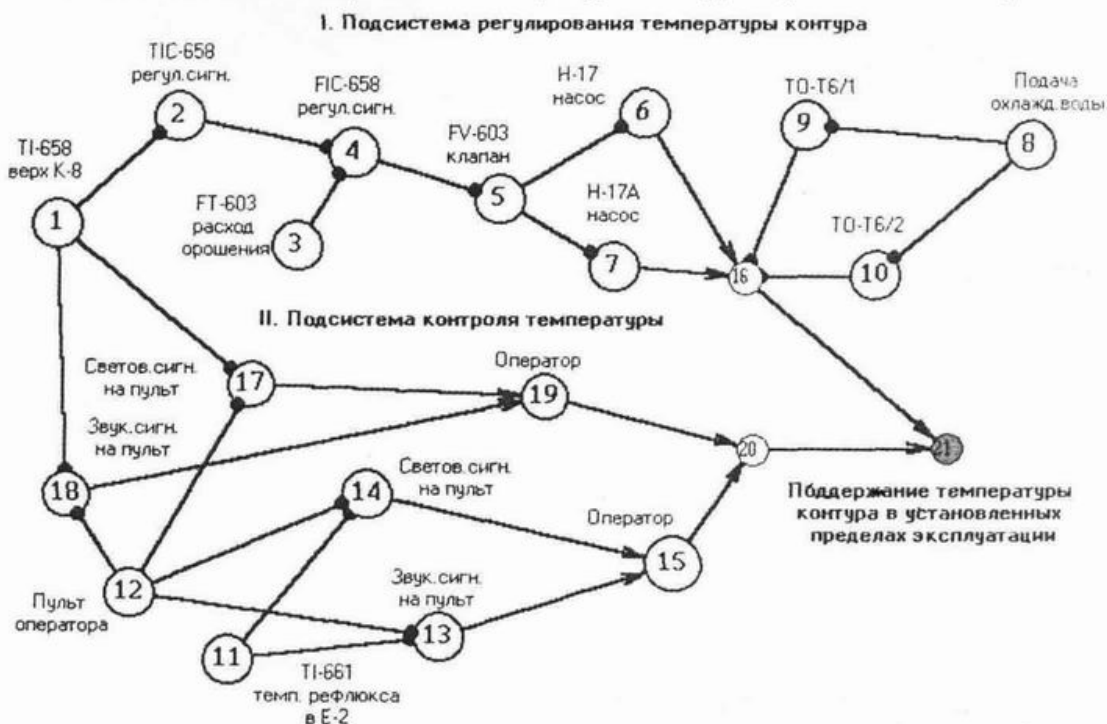
Таблица 1.
Давление насыщенного пара компонентов рефлюкса, кПа

Состав рефлюкса	Оборудование	Верх К-8	Конденсатор	Емкость Е-2
	Температура, °С	100	65	40
Пропан		4340	2181	1332
Бутан		1165	636	364
Равновесное давление		1764	928	546

Так как давление насыщенного пара зависит только от температуры, то основной причиной роста давления в контуре может стать нарушение нормального протекания теплообменных процессов как в колонне К-8, так и в емкости Е-2.

Согласно результатам расчетов, проведенных ранее, при нормальной эксплуатации блока и температуре верха колонны 100°С давление в верхней части колонны будет составлять 1.31 Мпа.

Рис. 1. СФЦ поддержание температуры контура в установленных пределах



Для обеспечения в контуре давления в пределах установленных эксплуатационных норм (13 кг/см^2) технологическим регламентом предусмотрены подсистемы автоматического регулирования, контроля температуры контура и сигнализации от ее отклонении, представленные на рис. 1 в виде схемы функциональной целостности (СФЦ) поддержания температуры контура в установленных эксплуатационных пределах.

Первая подсистема – автоматического поддержания температуры верха колонны К-8 в пределах 100°C предназначена для обеспечения технологического регламента стабилизации бензина и температуры рефлюкса в емкости Е-2. Эта задача решается за счет охлаждения газовой смеси в системе водяных конденсаторов Т-6/1 и Т-6/2 и автоматического регулирования подачи охлажденного рефлюкса из емкости Е-2 на острое орошение верха колонны.

Вторая подсистема осуществляет контроль температуры газовой смеси верха колонны, контроль температуры рефлюкса на выходе из конденсаторов Т-6/1 и Т-6/2 и сигнализирует на пульт оператору о превышении установленных пределов по температуре.

Безотказное функционирование первой подсистемы обеспечит поддержание температуры в пределах установленного регламента и, следовательно, обеспечит поддержание равновесного давления в контуре колонны К-8 и емкости Е-2 в пределах 13 кгс/см^2 . Возможными причинами повышения давления в контуре могут быть отказы основных элементов первой подсистемы и нарушение теплообменных процессов, протекающих в конденсаторе, например прекращение подачи охлаждающей воды.

Вторая подсистема предназначена для подачи светового и звукового сигнала оператору о переходе температуры из нормальных в допустимые пределы и принятия мер по нормализации температуры в контуре. Своевременные и грамотные действия оператора по оценке обстановки и выработке практических мер по нормализации ситуации обеспечит поддержание технологических параметров в допустимых пределах эксплуатации установки и предотвратят переход установки в предаварийный режим.

На этом этапе для нормализации давления в контуре в работу включается третья подсистема – автоматического регулирования давления, которая предназначена для нормализации давления в контуре К-8 и емкости Е-2 за счет сброса жирного газа на ГФУ.

Если значения технологических параметров (в частности температуры верха К-8 или рефлюкса в емкости Е-2) не удалось удержать в допустимых пределах, то начнется первый этап развития аварийной ситуации, так называемый предаварийный режим установки, который характеризуется образованием и накоплением внутренних факторов, способных в дальнейшем перевести установку в следующую стадию развития аварии. Так как с ростом температуры насыщенного пара пропан-бутановой смеси давление возрастает значительно быстрее, чем у идеального газа, даже небольшой по абсолютному значению прирост температуры может привести к значительному нарастанию давления в контуре.

При достижении давления 13.5 кгс/см^2 в работу включается четвертая подсистема безопасности – контроля и сигнализации роста давления в контуре К-8 – емкости Е-2, которая предназначена для подачи сигнала оператору о переходе установки в предаварийный режим. Если действия оператора не позволили нормализовать ситуацию, то при достижении давления 14.5 кгс/см^2 в работу включается пятая подсистема – блокировки, которая производит автоматическое отсечение подачи топливного мазута и топливного газа в печь П-2, тем самым снижая температуру бензина внизу колонны К-8, и, соответственно, воздействуя на температуру паров пропана и бутана.

В этом случае нарушается нормальное протекание процессов, предусмотренных технологическим регламентом. Для предотвращения аварии оператором осуществляются мероприятия по аварийному выводу из действия установки. Учитывая тот факт, что мгновенно остановить протекание тепломассообменных процессов невозможно, для предотвращения достижения критического давления (17 кгс/см^2) в контуре предусмотрена шестая подсистема – противоаварийной защиты по давлению. Для защиты контура от разгерметизации в системе предусмотрен сброс давления через линию предохранительных клапанов, которые включаются в работу при достижении давления 15.5 и 16.8 кгс/см^2 в верху колонны К-8 и, соответственно, 15.0 и 16.3 кгс/см^2 в рефлюксной емкости Е-2.

На рис. 2 показано, как с помощью перечисленных выше подсистем в блоке стабилизации бензина установки ЭЛОУ-АТ-6 переменные характеристики производственного процесса, а именно температура и давление, удерживаются в безопасных пределах.



Так как одной из основных причин нарушения нормального функционирования установки могут быть отказы технологического оборудования, основных узлов и элементов системы автоматического регулирования, контроля и противоаварийной защиты, в основе безопасной эксплуатации установки лежит надежность ее основных узлов и элементов.

Результаты расчета вероятности безотказной работы в течение года каждой из перечисленных выше подсистем приведены в таблице 2.

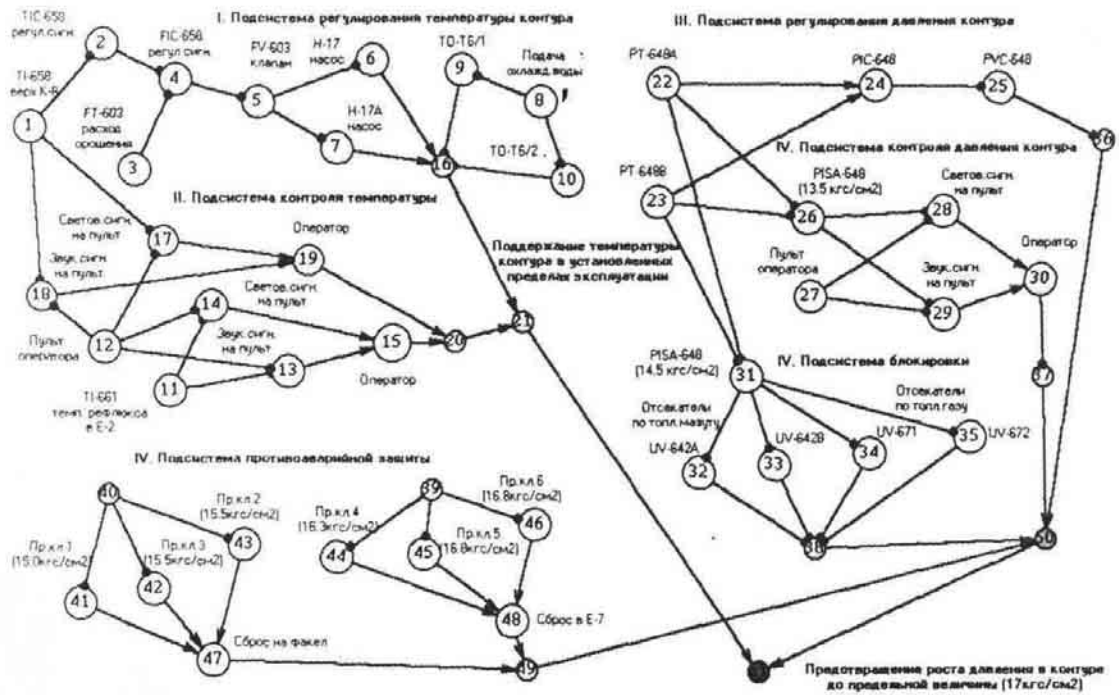
Таблица 2.

Вероятность безотказной работы системы автоматического регулирования, контроля, сигнализации и противоаварийной защиты блока стабилизации бензина

№ п/п	Наименование подсистемы	Вероятность безотказной работы, P(год)	Вероятность отказа, Q(год)	Наиболее значимые элементы
1	Регулирования температур	0.9708	0.0292	Конденсаторы Т-6/1 и Т-6/2
2	Контроля температуры	0.9864	0.0136	Датчик температуры ТП-661
3	Регулирования давления	0.9371	0.0629	Клапан сброса давления PVC-648
4	Контроля давления	0.9151	0.0849	Датчики давления РТ-648
5	Блокировки	0.8831	0.1169	Датчики давления РТ-648
6	Противоаварийной защиты	0.9975	0.0025	Отсечные клапана сброса на факел

Модель безопасного функционирования блока стабилизации бензина, построенная с помощью аппарата ОЛВМ, приведена на рис. 3.

Рис.3. Структурно-логическая модель безопасного функционирования блока стабилизации бензина по давлению



Данная модель представляет собой совокупность моделей надежного функционирования с учетом внешних факторов, существенно влияющих на безопасность системы в целом, а также учитывает действия оператора по нормализации основных параметров технологического процесса или по аварийной остановке системы. При этом основная функция модели безопасности – предотвращение роста давления в контуре выше предельного (17 кгс/см^2).

Результаты расчета основных показателей безопасности функционирования данной системы приведены в таблице 3. При этом полученные показатели позволяют оценить не только надежность и безопасность функционирования блока стабилизации, но и оценить вероятность образования, динамику развития опасных факторов на стадиях развития аварийной ситуации. Позволяют учесть влияние надежностных характеристик отдельных элементов, внешних факторов, а также действий оператора на предотвращение развития аварийной ситуации и ее последствия.

Таблица 3.
Результаты оценки безопасного функционирования блока стабилизации бензина установки ЭЛОУ-АТ-6

№ п/п	Выполняемая функция	Вероятность выполнения функции, Р(год)	Вероятность отказа, Q(год)	Наиболее значимые элементы
1	Поддержание давления в контуре в пределах допустимых	0.9836	$1.64 \cdot 10^{-2}$	Датчик TI-658, клапан FV-603, подача охлаждающей воды на конденсаторы Т-6/1

	норм до – 13.5 кгс/см ²			и Т-6/2
2	Поддержание давления в контуре в пределах допустимых норм до – 13.5 кгс/см ²	0.9989	$1.1 \cdot 10^{-3}$	Регулятор РИС-648, Клапан
3	Поддержание давления в контуре до – 14.5 кгс/см ² (Предотвращение перехода в предаварийный режим)	0.99972	$2.75 \cdot 10^{-4}$	Пульт оператора. Регулятор РИС-648, Клапан PVC-648
4	Предотвращение роста давления до предельной величины – 15 кгс/см ²	0.99989	$1.1 \cdot 10^{-4}$	Датчики давления РТ-648, Регулятор РИС-648, Клапан PVC-648
5	Предотвращение роста давления до критической величины 17 кгс/см ²	0.99999973	$2.7 \cdot 10^{-7}$	Датчики давления РТ-648, Регулятор РИС-648, Клапан PVC-648

Анализ результатов расчетов, полученных на начальном этапе исследования, позволяет сделать следующие практические выводы.

Вероятность разгерметизации рефлюксной емкости Е-2 в результате роста давления до критической величины в течение года непрерывной эксплуатации установки ЭЛОУ-АТ-6 составляет $2.7 \cdot 10^{-7}$.

Вероятность нарушения нормального протекания внутренних технологических процессов в колонне К-8 и перехода блока стабилизации в предаварийный режим, требующий аварийной остановки установки, в течение года составляет $1.1 \cdot 10^{-4}$.

Выделены наиболее значимые элементы системы безопасности для различных этапов функционирования системы. На этапе нормального функционирования блока для поддержания параметров технологического процесса в пределах установленного регламента наиболее важную роль играют такие элементы системы, как датчик температуры верха колонны К-8 (ТI-658), клапан подачи рефлюкса на орошение (FV-603), а также обеспечение конденсаторов Т-6/1, Т-6/2 охлаждающей водой.

Для предотвращения перехода системы в предаварийный режим, важную роль в системе безопасности играют регулятор давления (РИС-648), клапан сброса давления с емкости Е-2 на ГФУ (PVC-648) и безотказность в работе пульта оператора, на который приходят предупредительные сигналы по отклонению температуры и давления от допустимых норм.

В тоже время, на безопасность всей системы в целом, то есть на предотвращение аварии, связанной с разгерметизацией контура К-8 и емкости Е-2, наибольшее влияние оказывает работоспособность двух датчиков (РТ-648А и РТ-648В) по давлению в верхней части колонны К-8.

Результаты анализа, полученные на начальном этапе исследования, являются основой для выбора основных направлений совершенствования безопасной эксплуатации установки в целом и оценки возможного влияния на отдельные этапы развития аварийной ситуации в результате структурно-функциональных изменений в системе повышения надежности отдельных элементов и т.д.

На следующем этапе исследований проведенные расчеты позволяют оценить эффективность предлагаемых организационно-технических мероприятий. Результаты оценки эффективности представлены в таблице 4.

Таблица 4.
Результаты оценки эффективности мероприятий по совершенствованию
системы безопасности

№ п/п	Мероприятия по совершенствованию системы безопасности	Критерии оценки эффективности	
		Относительное снижение вероятности аварии	Относительное снижение вероятности нарушения технологического регламента
1.	Введение в систему третьего датчика по контролю давления верха колонны К-8	2.6 раза	-
2.	Введение в систему второго датчика контроля температуры верха К-8, замена клапана FV-603 на более надежный и повышение надежности системы подачи охлаждающей воды на конденсаторы	1.4 раза	1.6 раза
3.	Подготовка оператора к действиям по предупредительным и аварийным сигналам, своевременность выполнения действий, повышение эффективности планируемых мероприятий и т.д.	1.3 раза	1.46 раза

Так, например, введение в систему безопасности еще одного датчика по давлению на верху колонны К-8 приведет к снижению значимости данных элементов и к снижению вероятности разгерметизации емкости Е-2 в 2.6 раза и никак не влияет на удержание параметров технологического процесса в пределах эксплуатационных норм ($1.042e-7$). В то же время, если в технологическую схему добавить еще один датчик температуры верха колонны К-8, заменить клапан подачи рефлюкса на более надежный и одновременно повысить надежность системы подачи охлаждающей воды на конденсаторы, вероятность разгерметизации емкости Е-2 снизится в 1.4 раза, а вероятность выхода параметров технологического процесса за установленные эксплуатационные нормы снизится в 1.6 раза.

Кроме того, предлагаемая модель безопасности - = = = =, позволяет оценить роль оператора в управлении безопасностью данного технологического процесса и эффективность введения организационных мероприятий по совершенствованию безопасности системы. Так, например, высокая готовность оператора к грамотным и своевременным действиям по аварийным и предупредительным сигналам может позволить снизить вероятность аварии в 1.3 раза. В то же время его влияние на предотвращение нарушения технологических процессов в блоке и переход системы в противоаварийный режим несколько выше – вероятность нарушения технологического регламента уменьшается в 1.46 раза.

Таким образом, предлагаемая методика оценки безопасности организационно-технической системы и выработки мер по ее совершенствованию на первых этапах исследования позволяет решить следующие практические задачи:

1. Произвести оценку достигнутого уровня безопасности при эксплуатации системы.
2. Произвести сравнение основного показателя безопасности с требованиями руководящих документов и аналогичных систем.
3. Рассчитать показатели безопасности системы.
4. На основе анализа показателей безопасности выделить наиболее значимые элементы системы и выработать предварительные меры по совершенствованию системы безопасности.
5. Произвести прогноз изменения показателей безопасности системы для планируемых организационно-технических изменений системы.
6. На основе полученных расчетов оценить эффективность планируемых мероприятий по совершенствованию безопасности системы.

Результаты расчетов показателей безопасности системы являются основой для проведения исследований следующего этапа развития аварийной ситуации – формирования первичных поражающих факторов в результате аварии и оценки возможного ущерба.