

## РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ БЕЗВОДНОГО ФТОРОВОДОРОДА

С.В. Бойко, С.Н. Кладиев, И.А. Колодников

Северский технологический институт НИЯУ «МИФИ»

E-mail: kladiev@ssti.ru

*Проведен расчет надёжности оборудования производства безводного фтороводорода. Показано, что в технологической цепочке производства безводного фтороводорода слабым звеном является печное отделение. Даны рекомендации по мероприятиям, повышающим надёжность технологического процесса.*

### **Ключевые слова:**

*Производство безводного фтороводорода, надёжность технологического оборудования.*

### **Key words:**

*Manufacture of waterless fluoric hydrogen, reliability of the process equipment.*

### **Введение**

Фторирование урана является важным промежуточным этапом в основе технологии производства оружейного высокообогащенного, а также энергетического низкообогащенного урана, используемого в качестве топлива в большинстве ядерных реакторов для производства тепловой и электрической энергии [1]. Фторирование невозможно без важнейшего этапа в технологической цепочке – производства безводного фтороводорода.

### **Постановка задачи**

С целью повышения надёжности оборудования, стабильности проведения технологического процесса производства безводного фтороводорода (БФВ), необходимо определить количественные значения вероятности безотказной работы оборудования и провести анализ его работы с выявлением узких мест и выработкой рекомендаций по их устранению. В период становления атомной промышленности и запуска производства БФВ, который тогда использовался только для оборонных нужд, основной задачей было получение качественной продукции, и проблемы отказов элементов технологической схемы решались исключительно за счёт резервирования и создания параллельных технологических цепочек.

В настоящее время БФВ является товарным продуктом для многих отраслей промышленности, поэтому вопросы снижения себестоимости производства БФВ и обеспечения безопасных условий труда персонала вышли на первый план.

Ввиду наличия большого количества элементов технологической установки и значительного объёма вычислений возникла необходимость автоматизировать процесс расчёта надёжности.

### **Расчет надёжности технологического оборудования**

В атомной промышленности на первый план выходят принципы безопасности ядерного производства и ядерных технологий, надёжности технологического промышленного оборудования, а также обеспечение безопасности протекания и строгого выполнения технологического процесса [2].

Технологическая схема производства БФВ состоит из нескольких участков: печное отделение; узел промывки печного газа; распульповка; узел ректификации. Безводный фтороводород обычно получают термическим разложением флюоритового концентрата с содержанием фторида кальция 95...99 % с рабочей смесью кислот. Рабочая смесь – результат смешивания в заданных пропорциях концентрированной серной кислоты, воды и оборотной кислоты, возвращаемой из производственного цикла. Основная реакция осуществляется в барабанных печах при температуре 130...200 °С. Производительность печи диаметром 1,9 м и длиной 12 м составляет до 10 т безводного фтороводорода в сутки. Газы, образующиеся в печи, обычно содержат до 95 % фтороводорода и около 1 % примесей:  $\text{SiF}_4$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ .

Реакционный газ из печного отделения поступает в отделение конденсации, где его сжижают, охлаждая промышленной водой и рассолом. Сжиженный фтороводород поступает в отделение ректификации, откуда выдаётся в виде товарного БФВ в отделение готовой продукции. Газы, образующиеся в отделениях ректификации и конденсации, поступают в отделение абсорбции, где проходят очистку до санитарных норм и выводятся в вентиляцию. Прочие примеси удаляются в спецканализацию. Кислые растворы, образующиеся в процессе абсорбции и ректификации, поступают в сборник оборотной кислоты, откуда обратная кислота поступает в узел очистки реакционного газа и отделение приготовления рабочей смеси.

В статье приведен расчет безотказной работы оборудования печного отделения и узла ректификации как наиболее ненадежных элементов системы. Так же приведены термины и их определения, необходимые для понимания приведённого материала.

Отказом технологической системы считается неспособность системы нести заданную нагрузку по продукту. За отказ элемента технологической схемы принимаем дефект оборудования. По тяжести последствий дефекты оборудования можно разделить на три степени:

- I степень – дефект, устраняемый на ходу (без остановки оборудования);
- II степень – дефект, устраняемый при остановке оборудования, но не требующий немедленного останова;
- III степень – дефект, требующий немедленной остановки оборудования.

Горячий резерв – это элемент технологической схемы, включаемый в работу автоматически. Холодный резерв – это элемент технологической схемы, включаемый в работу с участием персонала. Ограниченный резерв – отремонтированный элемент технологической схемы, находящийся в холодном резерве.

Можно выделить три режима работы технологической линии производства БФВ:

- нормальная работа линии производства;
- предаварийная работа линии производства (на выходе возможен полупродукт);
- работа по переработке наработанного конденсата HF из емкостей (при остановке печного отделения).

При работе в нормальном режиме, когда все элементы работают в штатном режиме, технологическая линия должна обеспечивать заданную производительность по продукту требуемого качества (не имеется ни одного из трех типов дефектов, либо имеется дефект I степени).

При работе в предаварийном режиме, когда какой-либо элемент имеет дефект II степени и нуждается в ремонте, возможны некоторые отклонения в технологическом процессе (ухудшение качества продукта, снижение производительности).

Работа в режиме переработки наработанного конденсата HF из емкостей возможна при появлении дефекта III степени в одном из элементов печного отделения, что ведет к остановке производства конденсата HF, но производство фтороводорода не останавливается. Данный режим возможен при условии, что в емкостях имеется наработанный конденсат HF. Заполнение емкостей возможно при появлении дефекта III степени в одном из элементов узла ректификации, тогда при остановке этого узла, если имеются свободные емкости, в них направляется нарабатываемый конденсат HF.

Ежемесячно оборудование производства HF выводится в текущий ремонт для проведения ревизии и устранения дефектов II степени.

Основным статистическим материалом для определения количественных характеристик надёжности элементов технологической схемы являются журналы дефектов оборудования, в которых зафиксированы дефекты элементов технологической схемы производства БФВ за год работы.

На основании этих данных по методике [3, 4] определяются: параметры потока отказов исходя из количества дефектов  $n$ -го элемента за время его работы; вероятности безотказной работы за расчётный период при условии появления очередного события (отказа), подчиняющегося экспонен-

циальному закону распределения. В частности, этому распределению подчиняется величина промежутка времени между двумя смежными событиями простейшего потока [4].

#### Надёжность работы оборудования узла ректификации

На основании анализа аппаратурно-технологической схемы узла ректификации составляется последовательность расчёта надёжности этого участка (рис. 1).

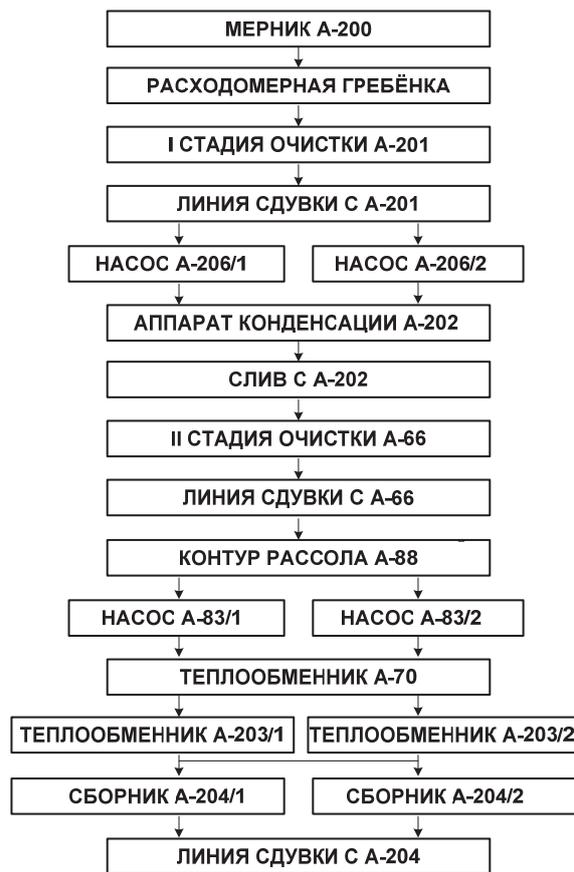


Рис. 1. Порядок расчёта надёжности узла ректификации

Последовательность элементов при расчёте надёжности произвольная, т. к. вероятность безотказной работы системы не зависит от места расположения элемента в ней.

Горячий резерв в узле ректификации имеет:

- насос А-83;
- теплообменник А-203;
- сборник кубовой кислоты А-204;
- насос А-206.

Для этих элементов технологической схемы вероятности безотказной работы за расчётный период рассчитывались по методике [3, 4].

Аппарат конденсации (А-202) и ректификационные колонны первой (А-201) стадии очистки и второй (А-66) стадии очистки в технологической схеме ректификации продублированы. Но этот резерв является условным, так как резервное оборудование должно быть отремонтировано и готово к

пуску в любой момент, а на момент сбора данных резерв был в ремонте.

Расчет надежности работы оборудования производства БФВ проведён в среде Microsoft Excel. Пример расчета надежности производства БФВ узла ректификации (табл. 1) приведён ниже.

На основании исходного статистического материала определены количественные характеристики надёжности элементов технологической схемы узла ректификации, а именно вероятность:

- безотказной работы (без единого дефекта) за расчётный период времени;
- появления дефекта, устраняемого на ходу;
- появления дефекта, устраняемого в текущий ремонт;
- аварийной остановки линии.

**Таблица 1.** Вероятность появления дефектов оборудования узла ректификации за год

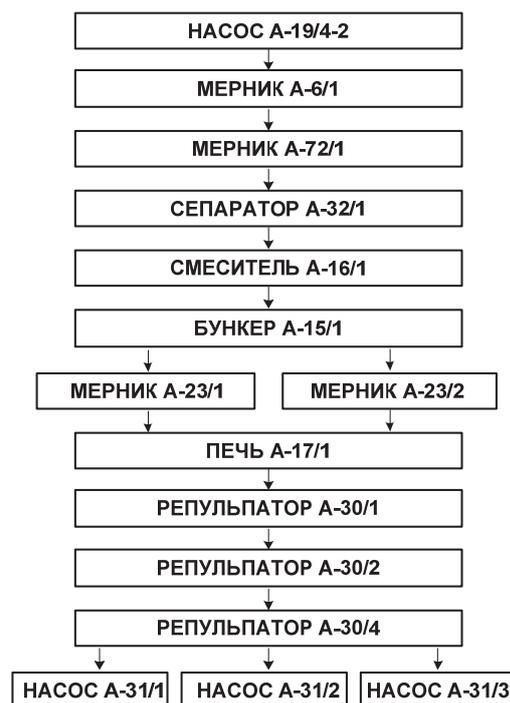
Элемент технологической схемы	Кол-во дефектов			Всего	Параметр потока отказов, $\omega \cdot 10^{-4} \cdot \text{ч}^{-1}$	Вероятность бездефектной работы, $P$	Вероятность появления дефекта, $Q$
	I ст.	II ст.	III ст.				
Мерник конденсата HF A-200	-	1	-	1	1,1	0,9211	0,0789
Расходомерная гребенка	-	4	-	4	4,6	0,7198	0,2802
1 стадия очистки A-201	-	-	3	3	3,4	0,7815	0,2185
Линия сдувки с A-201	-	1	-	1	1,1	0,9211	0,0789
Насос A-206 <sub>1</sub>	1	-	-	1	0,8	0,9938	0,0062
Насос A-206 <sub>2</sub>	1	-	-	1	1,4		
Аппарат конденсации газообразного HF A-202	-	2	1	3	3,4	0,7815	0,2185
Линия слива с A-202	-	-	1	1	1,1	0,9211	0,0789
2 стадия очистки A-66	-	-	-	2	2,3	0,8484	0,1516
Линия сдувки с A-66	-	3	2	3	3,4	0,7815	0,2185
Контур теплого рассола A-88	-	1	-	1	1,1	0,9211	0,0789
Насос A-83 <sub>1</sub>	1	-	-	1	1,5	0,9938	0,0062
Насос A-83 <sub>2</sub>	1	-	-	1	0,7		
Теплообменник на сливе A-70	1	-	1	2	2,3	0,8484	0,1516
Теплообменник A-203 <sub>1</sub>	-	1	-	1	1,3	0,9938	0,0062
Теплообменник A-203 <sub>2</sub>	-	1	-	1	0,9		
Сборник кубовой кислоты A-204 <sub>1</sub>	2	3	-	5	5,7	0,8376	0,1624
Сборник кубовой кислоты A204 <sub>2</sub>	5	3	-	8	9,1		
Линия сдувки с A-204	1	5	-	6	6,8	0,6107	0,3893
Итого	13	25	8	46	-	0,0894	0,9106

### Надежность работы оборудования печного отделения

В печном отделении работают три линии.

На основании анализа аппаратурно-технологических схем составлены технологические и структурные схемы надежности по каждой линии печного отделения. Порядок расчёта надежности первой линии печного отделения приведен на рис. 2.

Из схем видно, что в первой линии мерник A-23 и центробежный насос A-31 имеют горячий резерв. Для этих элементов технологической схемы вероятности безотказной работы за расчётный период рассчитаны по методике [3, 4].



**Рис. 2.** Порядок расчёта надежности первой линии печного отделения

Результаты расчётов надёжности могут быть представлены не только в виде таблиц, но и в удобной для восприятия графической форме. Гистограмма вероятности появления отказов элементов технологической схемы первой линии печного отделения за год работы приведена на рис. 3.

Вторая линия печного отделения – не основная, не имеет резервных элементов и работает в дополнение к основным линиям. В составе третьей линии горячий резерв имеет мерник олеума А-72.

На основании исходного статистического материала, определены количественные характеристики надёжности элементов технологической схемы по каждой линии печного отделения по методике [3, 4].

### Суммарная надежность работы линии производства безводного фтороводорода

Для расчета вероятности безотказной работы линии производства безводного фтороводорода необходимо рассчитать суммарную надежность оборудования печного отделения и узла ректификации. При расчете суммарной надежности учитывается только вероятность появления дефектов III степени, т. к. остальные дефекты не ведут к остановке основного оборудования.

Результаты расчетов по участкам линии производства БФВ сведены в табл. 2.

При оценке суммарной надежности линии производства безводного фтороводорода необходимо учесть тот факт, что при остановке печного отделения (прекращении производства конденсата HF первой и третьей линиями печного отделения) технологическая линия может продолжать работать

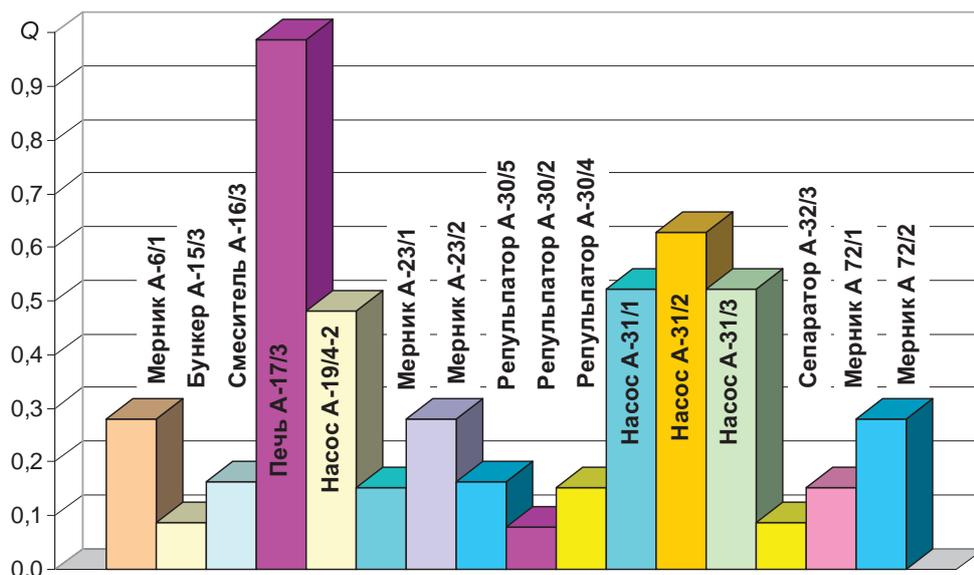


Рис. 3. Вероятность появления отказов технологического оборудования первой линии печного отделения за год

при наличии в емкостях готового конденсата HF, с учетом возможности пополнения емкостей второй линией печного отделения. Вторая линия печного отделения не может нести основную нагрузку и является дополнительной. При работе первой (третьей) линии суммарная надежность печного отделения и емкостей конденсата HF рассчитывается по формуле:

$$P_{пе} = 1 - (1 - P_{1л})(1 - P_е),$$

где  $P_{1л}$  – вероятности безотказной работы за расчетный период первой линии печного отделения;  $P_е$  – вероятность того, что конденсата HF в емкостях хватит на время устранения дефекта III степени в печном отделении.

Таблица 2. Вероятность появления дефектов оборудования по участкам

Участок технологической схемы		Вероятность появления дефекта за расчетный период времени, Q			
		I степени	II степени	III степени	Любого
Линии печного отделения	Первая	0,962	0,947	0,993	0,999
	Вторая	0,958	0,991	0,947	0,999
	Третья	0,724	0,844	0,961	0,998
Узел ректификации		0,205	0,766	0,482	0,911

Суммарная надежность линии производства безводного фтороводорода при работе первой (третьей) линии печного отделения будет равна произведению вероятности безотказной работы за расчетный период узла ректификации и суммарной надежности печного отделения и емкостей конденсата HF.

Вероятность того, что конденсата HF в емкостях хватит на время устранения дефекта III степени в печном отделении, примем  $P_е=0,25$ . Тогда суммарная вероятность безотказной работы линии

производства безводного фтороводорода при работе первой линии печного отделения будет равна  $P_{\Sigma}=0,192$ , а при работе третьей линии печного отделения –  $P_{\Sigma}=0,145$ .

Первая и третья линии печного отделения являются холодным резервом друг для друга. При остановке одной из линий в течение нескольких часов можно запустить другую, если она в рабочем состоянии, но это в любом случае приведет к остановке печного отделения.

Средняя вероятность безотказной работы производства безводного фтороводорода за расчетный период времени составляет  $P_{ср}=0,17$ . Однако в расчете надежности линии производства безводного фтороводорода не учитывалась надежность узлов: промывки печного газа, гидроудаления отвала, конденсации и сорбции, выгрузки сырья и передачи готовой продукции. При учете надежности этих узлов расчетная надежность производства безводного фтороводорода будет ниже значения 0,17.

В расчете суммарной надежности линии производства безводного фтороводорода учитывались только дефекты III степени, которые ведут к остановке технологической линии, но на выполнение плана по продукту влияют и дефекты II степени, которые ведут к отклонениям в технологическом процессе (ухудшение качества продукта, снижение производительности), а также дефекты I степени, отвлекающие персонал. При одновременной работе двух линий печного отделения вероятность безотказной работы уменьшается из-за потери резерва, который используется другой линией, и увеличения нагрузки на персонал; план в этом случае увеличивается с расчетом на работы второй линии.

Для повышения надежности печных отделений производства безводного фтороводорода предложены и внедрены следующие технические решения:

- перешли от релейно-контакторного регулирования к плавному аналоговому регулированию тока нагрева барабанной вращающейся печи с использованием числоимпульсного способа управления [5–7];
- реализована система управления температурным режимом барабанной вращающейся печи [8];
- внедрено управление частотой вращения электроприводов шнека загрузки и вращения барабана печи [9];
- реализован предварительный подогрев жидкофазных реагентов для ускорения разложения флюорита в печи [10].

Надежность производства безводного фтороводорода недопустимо низкая ( $P_{cp}=0,17$ ), а основным способом ее повышения является резервирование технологического оборудования. Но даже при наличии резервных элементов в печном отделении вероятность безостановочной работы производства безводного фтороводорода остается низкой. При горячем резервировании переход с работающей на резервную происходит только во время технологической останковки, что приводит к дополнительным затратам по времени и снижает производительность установки. Узел ректификации влияет на надежность технологического процесса производства безводного фтороводорода в меньшей степени ( $Q=0,911$ ). При выходе из строя его элементов, на период их ремонта, имеется возможность сбора конденсата HF в резервные

емкости большого объема. Конденсат HF после восстановления работоспособности узла ректификации перерабатывается и используется повторно в качестве оборотной кислоты. Самым ненадежным аппаратом в технологической цепочке производства безводного фтороводорода является печь ( $Q=0,999$ ).

Данные, полученные при расчёте надёжности производства фтороводорода, необходимы для разработки системы управления надёжностью технологического оборудования и повышения качества выпускаемой продукции.

#### Выводы

Применение средств автоматизации для расчётов надёжности оборудования технологических процессов и создание баз данных, повышающих точность и скорость расчётов при обработке больших массивов исходных данных, позволяет проводить анализ технического состояния оборудования, оценивать динамику изменения и управлять его надёжностью с возможностью графического представления результатов.

Модернизация технологической схемы производства безводного фтороводорода, особенно самого ненадёжного элемента – барабанной печи и системы её нагрева, позволило увеличить время безотказной работы, повысить надёжность технологического оборудования и снизить текущие издержки на его эксплуатацию.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тураев Н.С., Жерин И.И. Химия и технология урана. – М.: Руда и металлы, 2006. – 396 с.
2. Безопасность ядерного топливного цикла / Агентство по ядерной энергии. Организация экономического сотрудничества и развития. – М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2002. – 196 с.
3. ГОСТ 27.301-95. Надёжность в технике. Расчёт надёжности. Основные положения. = Dependability in technics. Dependability prediction. Basic principles. Переизд. 01.07.2002 с изм. 20.07.2010. – Взамен ГОСТ 27.410-87 в части п. 2; Введ. 01.01.1997. – М.: Изд-во стандартов, 2010. – 13 с.
4. Надёжность технических систем. Справочник под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 606 с.
5. Кладиев С.Н., Пищулин В.П., Трухин Ю.В. Система управления процессами производства фтороводорода // Известия вузов. Физика. – 2004. – Т. 47. – № 12. – С. 214–218.
6. Кладиев С.Н., Пищулин В.П., Трухин Ю.В., Дементьев Ю.Н. Исследование процесса сернокислотного разложения флюорита в барабанной вращающейся печи // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 3. – С. 104–106.
7. Кокорев С.В., Букреев В.Г. Система нечеткого регулирования температуры электронагревательных установок // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 6. – С. 146–149.
8. Кладиев С.Н., Зарипова Л.Ф., Пищулин В.П. Оптимизация работы барабанной вращающейся печи с косвенным электрическим обогревом и регулируемой частотой вращения // Актуальные проблемы урановой промышленности: Сб. докл. V Междунар. научно-практ. конф. – 18–20 сентября 2008. – Алматы: ТОО «Viva-promotion», 2008. – С. 370–383.
9. Кладиев С.Н., Дементьев Ю.Н., Робканов Д.В. Прямое управление моментом в асинхронном электроприводе шнека дозатора // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 3. – С. 140–143.
10. Кладиев С.Н., Дементьев Ю.Н., Зарипова Л.Ф., Пищулин В.П. Влияние предварительного подогрева жидкофазных реагентов на процесс разложения флюорита // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 3. – С. 32–35.

Поступила 24.03.2011 г.