

РЕАКТОРЫ-РАЗМНОЖИТЕЛИ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ ВО ФРАНЦИИ

Майкл Шнейдер

Франция является единственной страной в мире, в которой когда либо работал реактор-размножитель на быстрых нейтронах (РРБН) коммерческого масштаба (1200 МВт-эл.) с натриевым охлаждением и плутониевым топливом «Суперфеникс» в Крез-Малвилле. Однако, французская программа РРБН оказалась слишком дорогой и она никогда не могла конкурировать с технологией легководных реакторов. Многочисленные технические проблемы, низкие цены на уран и массовая оппозиция усилили слабые экономические и эксплуатационные показатели РРБН. «Суперфеникс» работал только половину из того времени, когда он был официально подключен к сети, и был выключен в 1998 году со средним по времени эксплуатации фактором нагрузки менее 7%.

Предшественник «Суперфеникса», реактор «Феникс» в Маркуле, который начал работать в 1973 году и будет выключен позже, в конце 2009 года, сталкивался с многочисленными утечками натрия и рядом потенциально опасных инцидентов с реактивностью. Средний по времени эксплуатации фактор нагрузки составлял примерно 45% и является одним из самых низких в мире.

Автор работает международным консультантом по энергетической и ядерной политике, Париж, Франция.

Статья получена 2 апреля 2009 года, принята к публикации 9 апреля 2009 года.

Почтовый адрес для корреспонденций: Mycle Schneider, 45, Allee des deux cedres, 91210 Draveil, France.

Электронный адрес: mycle@orange.fr

ВВЕДЕНИЕ

Французская программа производства и выделения плутония началась сразу же после окончания второй мировой войны. Хотя ее начальной задачей было выделение плутония для программы ядерного оружия, с самого начала второй стратегической целью стал реактор-размножитель на быстрых нейтронах. Другой целью было европейское сотрудничество и в 1957 году был создан консорциум EURO-CHEMIS с участием 10 стран, из которых наибольшая доля приходилась на Францию и Германию (по 17% на каждую)¹.

Первый перерабатывающий завод «фабрика плутония» UP1 был запущен в Маркуле в 1958 году, и первое предложение по экспериментальному РРБН «Рапсодия» было подготовлено в том же году. Предварительные исследования для реактора в 1000 МВт-эл. были проведены еще в 1964 году.

Поведение материалов под действием нейтронного облучения изучалось на установке «Гармония», начиная с 1965 года, и вопросы конфигурации активной зоны исследовались на критической установке «Мазурка», начиная с 1966 года. Эти исследовательские установки располагались на площадке Кадараш в Южной Франции. Намного позже, в 1982 году, также в Кадараше, была спроектирована установка «Эсмеральда» для исследования пожаров натрия. Хотя большая часть расходов на исследования финансировалась французским Комиссариатом по атомной энергии (КАЭ), до 35% некоторых исследовательских проектов финансировались ЕВРАТО-МОМ.

В 1966 году в Ла Хаге начал работу второй коммерческий перерабатывающий завод UP2, полностью финансируемый Комиссариатом по атомной энергии (СЕА) (с выплатой равных долей из гражданского и военного бюджетов), выделяющий плутоний из топлива газо-графитовых реакторов. В Бельгии завод EUROCHEMIS начал работу в 1967 году. Он работал только до 1974 года и переработал 181,31 тонны отработанного топлива различных типов и происхождения. Через два года КАЭ запустил в Ла Хаге линию для легководных реакторов (UP2-400) и создал дочернюю компанию (100%) SOGEMA по частному законодательству. Иностранное (немецкое) топливо стало посылаться в Ла Хаг еще в 1973 году. Не существовало абсолютно никакого опыта в переработке топлива легководных реакторов со

степенью выгорания существенно большей, чем у газ-графитовых реакторов, и компании SOGEMA потребовалось 11 лет, пока в 1987 году она не начала работать с номинальной мощностью 400 тонн в год.

РАПСОДИЯ, КАДАРАШ

Строительство во Франции первого экспериментального реактора «Рапсодия» с охлаждением жидким натрием началось в 1962 году, и он достиг критичности в 1962 году при номинальной мощности в 20 МВт-тепл. В конце 1967 года его мощность была увеличена до 24 МВт-тепл., и в 1970 году, после доработки активной зоны, до 40 МВт-тепл. В июне 1980 года его рабочая мощность была уменьшена до 22 МВт-тепл. для того, чтобы свести к минимуму тепловые напряжения, которые считались причинами появления трещин в баке реактора. Реактор проработал до апреля 1983 года, после чего он был выключен навсегда.

«Рапсодия» была реактором контурного типа, т.е. с теплообменником между первичным и натриевым контурами вне бака реактора. Он был настолько близким, насколько это возможно, к базовой конструкции, предполагаемой для коммерческих приложений (охладитель из расплавленного натрия, материалы реактора, плотность мощности, и т.п.). Топливо состояло из 30% PuO₂ и 70% UO₂. Активная зона содержала 31,5 кг плутония-239 и 79,5 кг урана-235. Средняя продолжительность периода выдержки топлива равнялась 80 дням, и топливо достигало степени выгорания в 102 000 МВт·день/т².

ФЕНИКС, МАРКУЛЬ

В феврале 1968 года, когда «Рапсодия» проработала уже один год, в Маркуле начались земляные работы на строительной площадке реактора «Феникс» в 250 МВт-эл. (563 МВт-тепл.). В 1969 году КАЭ и принадлежащая французскому правительству коммунальная компания «Электрисите де Франс» (EDF) подписали протокол о совместном строительстве и эксплуатации электростанции «Феникс». Владение и расходы разделялись как 80% для КАЭ и 20% для компании «Электрисите де Франс» (EDF). Стандартная активная зона «Феникса» содержит 931 кг плутония с 77% Pu-239. Реактор достиг критичности 31 августа и был подсоединен к сети 13 декабря 1973 года³, на год раньше реактора PFR в Великобритании. До 2005 года средняя продолжительность периодов выдержки топлива составляла 90 дней, и топливо достигало степени выгорания в 150 000 МВт·день/т⁴.

17 октября 1973 года, между датами достижения критичности и подсоединения к сети реактора «Феникс», страны-члены ОПЕК инициировали то, что стало известным как первый нефтяной кризис, своими решениями о прекращении поставок нефти в несколько стран, которые поддержали Израиль, и значительном увеличении цен на сырую нефть. В 1974 году французское правительство приняло решение по своей первой серии из 16 энергетических реакторов. МАГАТЭ предсказало, что в 2000 году установленная мощность атомных электростанций достигнет 4 450 ГВт. Между 1973 и 1978 годами цены на уран на рынке наличного товара возросли с 8 до 40 долларов за фунт U₃O₈. Плутоний рассматривался как долгосрочное решение проблем поставки ядерного топлива.

До конца 1980-х годов у «Феникса» была замечательная история эксплуатации. Затем, после нескольких необъясненных скачков реактивности, фактор нагрузки упал практически до нуля. Инциденты имели серьезные последствия для безопасности (см. ниже). Реактор оставался выключенным большую часть 1991 и 1994 годами до тех пор, пока не была проведена обширная исследовательская программа. Он повторно запускался на очень короткое время - вероятно для того, чтобы избежать юридического требования проведения новой лицензионной процедуры после двухлетнего выключения. Кроме того, между 1994 и 2002 годами была проведена дорогая программа модернизации (см. историю эксплуатации на рис. 1). В июне 2003 года национальное управление ядерной безопасности (ASN) разрешило повторный запуск «Феникса» на шесть периодов перезагрузки топлива на мощности в две трети от первоначальной. Это разрешало эксплуатацию до конца 2008 года, и, возможно, в течение 2009 года. Номинальная чистая мощность была уменьшена с 233 МВт-эл. до 130 МВт-эл.

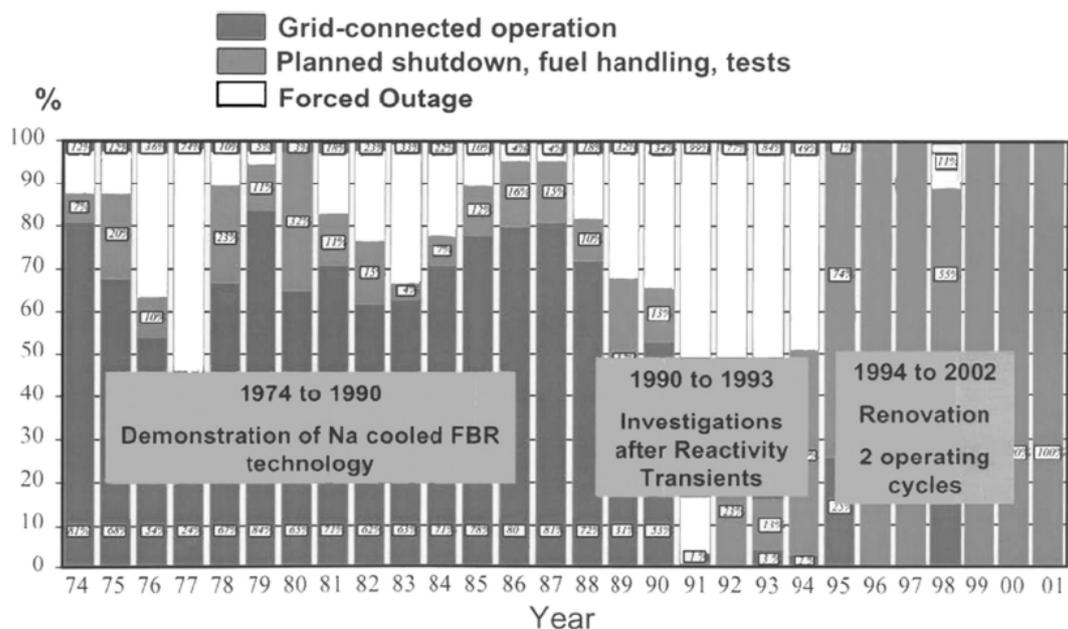


Рис. 1: История эксплуатации французского реактора-размножителя «Феникс», 1974 – 2002 годы. Источник: IAEA, Fast Reactor Database 2006 Update. Легенда сверху рисунка (сверху вниз): 1 – эксплуатация с подключением к сети; 2 - запланированное выключение, операции с топливом, испытания; 3 - вынужденный простой. Текст на рисунке (слева направо): 1 – 1974 – 1990 – демонстрация технологии охлаждаемого натрием реактора-размножителя на быстрых нейтронах; 2 – 1990 – 1993 – исследования после скачков реактивности; 3 – 1994 – 2002 – обновление, два эксплуатационных цикла. На вертикальной оси показан фактор нагрузки, на горизонтальной оси отложены годы.

На конец 2007 года кумулятивный фактор нагрузки реактора составлял 44,66 процента⁵.

СУПЕРФЕНИКС, КРЕЗ-МАЛВИЛЬ

В 1971 и 1972 годах, еще до первого нефтяного кризиса, энергетические компании Франции, Германии и Италии подписали несколько соглашений по совместному строительству двух коммерческих реакторов-размножителей, одного во Франции и другого в Германии. В декабре 1972 года французский парламент принял закон, который разрешал создавать компании, которые «осуществляют деятельность в европейских интересах в секторе электроэнергетики»⁶. Этот закон был предназначен для создания компании NERSA,⁷ которая была основана в 1974 году сразу же после запуска реактора «Феникс» с целью строительства первого в мире РРБН коммерческого размера с плутониевым топливом⁸. Парламентский комитет по расследованию для реактора «Суперфеникс» позднее отметил, что «общественное обсуждение» проекта было «исключительно коротким». Оно продолжалось всего месяц с 9 октября до 8 ноября 1974 года⁹.

Проект немедленно привлек значительную оппозицию. В ноябре 1974 года 80 физиков из Лионского физического института подчеркнули особые риски технологии реакторов-размножителей и в феврале 1975 года около 400 ученых инициировали прошение, в котором были изложены их опасения по французской ядерной программе вообще и РРБН в частности. В том же году немецкая энергетическая компания RWE передала свои акции NERSA европейскому консорциуму SBK¹⁰, который планировал построить реактор-размножитель SNR-300 в Калкаре в Германии. Андре Жиро, в то время руководивший КАЭ, настаивал на быстром и массовом строительстве реакторов-размножителей, поскольку задержки в их введении могли бы иметь «катастрофические последствия на ожидаемую экономию урана»¹¹. Комиссия общественного обсуждения проекта «Суперфеникс» оценила, что в 2000 году реакторы-размножители будут поставлять четверть энергии французских атомных электростанций.

В середине апреля 1976 года узкий энергетический совет под председательством президента Валери Жискара д'Эстена принял политическое решение о строительстве реактора «Суперфеникс». Немедленно были начаты работы по подготовке площадки в Крез-Малвилле (45 км к востоку от Лиона, 60 км от Гренобля, и 70 км от Женева). Парламентский комитет по расследованию через 22 года отметил:

«После того, как было принято решение о строительстве, электроэнергетические компании не успокоятся до тех пор, пока они не достигнут успеха. Будучи уверены в хорошо обоснованном решении, они не позволят местным консультациям замедлить их, последнее может быть квалифицировано как минимальное.»¹²

«Официальное» общественное решение было объявлено только через год позже. Парламентский комитет по расследованию удивляется:

«Наконец, что можно думать о правительственном решении разрешить создание станции, датированном 12 мая 1977 года, которое произошло после начала подготовительных работ по предварительной инфраструктуре и площадке и после начала строительства реактора?»¹³

Летом 1976 года около 20 000 человек заняли площадку, протестуя против строительства «Суперфеникса». Между 1974 и 1976 годами около 50 муниципалитетов в регионе присоединились к оппозиции проекту, и в ноябре 1976 года около 1300 ученых их региона Женева выпустили открытое письмо правительствам Франции, Италии, Германии и Швейцарии, озвучив свои опасения по проекту.

Председатель КАЭ и вскоре назначенный министром промышленности Андре Жиро был еще более оптимистичным, чем раньше, и на собрании Американского ядерного общества в декабре 1976 года в Вашингтоне предсказал, что в 2000 году в мире будет 540 коммерческих реакторов-размножителей, из которых 20 будут во Франции. Он прогнозировал, что в 2025 году количество блоков РРБН с размерами, как у «Суперфеникса», во всем мире достигнет 2 766¹⁴. Фактически, в 2000 году во всем мире не работал ни один РРБН с размерами, как у «Суперфеникса».

31 июля 1977 года рядом со строительной площадкой «Суперфеникса» в Крез-Малвилле произошла большая международная демонстрация примерно с 50 000 участников, ставшая исключительно ожесточенной. Полицейские отряды по борьбе с беспорядками применили гранаты, что привело к смерти Виталия Мишалона, местного учителя. Другой демонстрант потерял ногу, а третьему ампутировали руку. Эти события нанесли серьезную травму французскому антиядерному движению. Государство не изменило своих планов. Через три дня после событий Рене Монори, тогдашний министр промышленности, заявил: «Правительство будет продолжать строительство в Крез-Малвилле и «Суперфеникса», потому что это является вопросом жизни и комфорта французского народа»¹⁵. Строительство продолжилось.

Комбинация начала строительства консорциумом EURODIF по обогащению урана своего завода в Трикастене в 1979 году и продвижение европейской плутониевой индустрии были попытками достижения независимости от того, что некоторые принимающие решения лица и лидеры промышленности воспринимали как ядерное «превосходство» США. Президент Франции Валери Жискара д'Эстен заявил, что «если уран из французской земли будет использоваться в РРБН, мы во Франции будем иметь потенциальные энергетические ресурсы, сравнимые с ресурсами Саудовской Аравии»¹⁶. Политика нераспространения президента США, сильно критическая по отношению к выделению и использованию плутония, рассматривалась КАЭ «полностью абсурдной»¹⁷.

В 1982 году Жан-Луи Фенш, инженер КАЭ, подготовил 250-страничный отчет по РРБН для высшего совета по ядерной безопасности, консультативного органа. Фенш пришел к выводу, что «РРБН являются наиболее сложными, наиболее загрязняющими, наиболее неэффективными, и наиболее амбициозными средствами, которые до сих пор изобрел человек для того, чтобы уменьшить потребление ядерного топлива»¹⁸.

В то время, когда «Суперфеникс» достиг критичности в 1985 году, международный энтузиазм к атомной энергии уже прошел свой пик и количество реакторов, строительство которых было начато, уменьшилось с максимума в 40 в 1975 году до 13 в 1985 и до 1 в 1986 году. Катастрофа в Чернобыле в 1986 году только ускорило уменьшение атомных проектов. «Суперфеникс», задачей которого была экономия урана, устарел раньше, чем он был запущен. Цена на уран на наличном рынке упала с 40 до 15 долларов за фунт, чуть больше, чем цена 1974 года. По сравнению со спросом, ресурсы урана были обильными.

Тем не менее, лица, принимающие решения во Франции, не изменили своего мнения. В результате страна построила очень большие избыточные мощности генерации электроэнергии (по крайней мере десять избыточных атомных энергоблоков в середине 1980-х годов) и полномасштабную плутониевую экономику, которая давно потеряла смысл своего существования. Между 1987 и 1997 годами переработка отработанного топлива в Ла Хаге увеличилась вчетверо и достигла примерно 1700 тонн в год, из которых около половины приходилось на иностранных клиентов. При приблизительном содержании плутония примерно в 1 процент, установки в Ла Хаг в 1997 году выделили примерно 17 тонн плутония. Это грубо соответствует общему кумулятивному количеству плутония, которое было облучено во французских реакторах-размножителях на конец 1996 года, когда «Суперфеникс» был навсегда выключен²⁰.

В активной зоне «Суперфеникса» содержится 5780 кг плутония (4054 кг Pu-239). При работе на номинальной мощности с ежегодной перезагрузкой одной трети активной зоны «Суперфеникс» потребляет около 1900 кг плутония в год. Но в течение своего 11-летнего «эксплуатационного» периода «Суперфеникс» даже не использовал эквивалента одной активной зоны реактора (см. рис. 2).

Чистая номинальная мощность «Суперфеникса» равна 1200 МВт-эл. (валовая 1240 МВт-эл.). 7 сентября 1985 года он достиг критичности и 14 января 1986 года он был подсоединен к сети. Однако, он столкнулся с многими техническими и административными проблемами, и он был выключен в течение более половины времени до 24 декабря 1996 года, когда он произвел свой последний киловатт-час. Всего «Суперфеникс» произвел 8,2 тераватт-часа электроэнергии (валовых), почти половина из которых пришлась на его последний год эксплуатации. Его средний фактор нагрузки был меньше 7% (см. рис. 3).

Как показывают рис. 2 и 3, «Суперфеникс» столкнулся с рядом значительных аварий и административных препятствий. Реактор никогда не работал более 17 месяцев подряд. Эксплуатация была прервана в мае 1987 года в связи с обнаружением большой утечки натрия в баке передачи топлива или барабане хранения. Бак нельзя было заменить и потребовалось 10 месяцев для разработки нового подхода к загрузке и выгрузке топлива из активной зоны реактора.

Авария выявила также серьезные недостатки во французской организации реакторов-размножителей. Перед утечкой, в конце 1985 года, инженерное подразделение NOVATOME компании FRAMATOME сократило более половины своего персонала, 430 из 750 сотрудников. Подразделение NOVATOME потеряло много денег из-за того, что оно не могло выставить счет за работы по «Суперфениксу» компании NERSA до тех пор, пока реактор не войдет в коммерческую эксплуатацию²¹. В ходе перемещения своих сократившихся инженерных групп из Парижа в Лион многие эксперты получили привлекательные предложения покинуть NOVATOME. В результате, когда произошла утечка бака хранения, компания NERSA обнаружила, что специалист, который управлял электронной базой данных по баку, уволился, и потребовалось некоторое время, чтобы можно было войти в базу данных. Повторная квалификация и авторизация новой схемы передачи и хранения топлива заняла еще 13 месяцев перед тем, как реактор смог возобновить работу в апреле 1989 года. Работа на малой мощности продолжалась до июля 1990 года, когда неисправный компрессор привел к большой протечке воздуха в систему и окислению натрия. Очистка натрия заняла еще восемь месяцев. В декабре 1990 года крыша турбинного зала провалилась после сильного снегопада (см. рис. 4).

3 июня 1991 года компания NERSA потребовала произвести повторный запуск реактора в июле 1991 года. Однако, 27 мая 1991 года Государственный совет Франции аннулировал лицензию на повторный запуск 1989 года, которая была юридически оспорена французскими и швейцарскими оппонентами. повторный запуск, в отличие от первоначальной процедуры лицензирования, стал предметом длительного процесса парламентских слушаний и дебатов на региональном и национальном уровне. В июне 1992 года правительство решило заказать отчеты экспертов и потребовать нового публичного обсуждения, которое было проведено с 30 марта по 14 июня 1993 года. Комиссия публичного обсуждения выпустила свой отчет 29 сентября 1993 года и органы ядерной безопасности представили свои отчеты правительству в январе 1994 года. Новая эксплуатационная лицензия была окончательно выпущена 11 июля 1994 года. Однако, энергоблок проработал всего семь месяцев, когда утеч-

ка аргона в теплообменнике вызвала новый простой. Новый запуск реактора в сентябре 1995 года оказался последним.

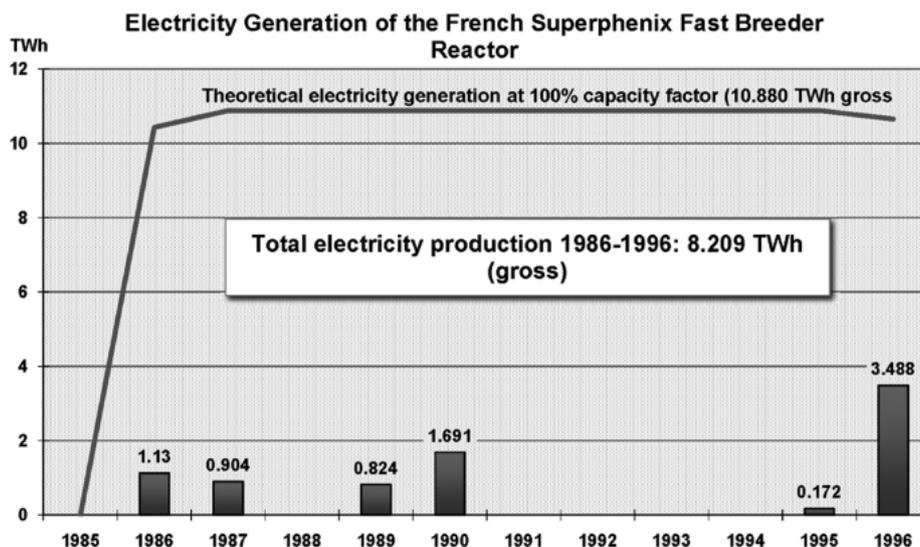


Рис. 2: Годовое производство электроэнергии на реакторе «Суперфеникс». Источник: СЕА, WISE-Paris. По вертикальной оси отложена произведенная энергия в ТВт·час, на горизонтальной оси показаны годы. Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 – теретическое производство электроэнергии при факторе нагрузки в 100% (валовое 10 880 ТВт·час); 2 – общее валовое производство электроэнергии в 1986 – 1998 годах: 8,209 ТВт·час.

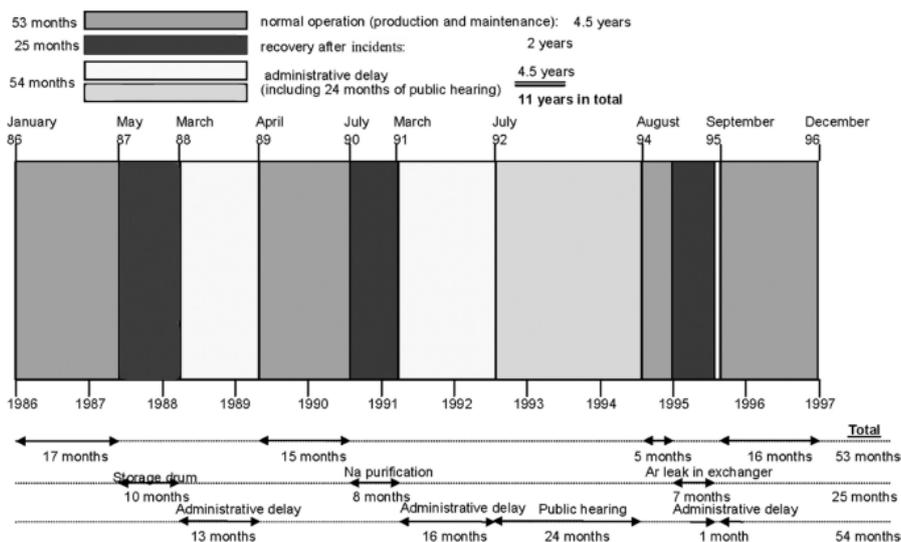


Рис. 3: Эксплуатационная и административная история «Суперфеникса». Источник: IAEA, Fast Reactor Database 2006 Update. Легенда над рисунком (сверху вниз): 1 – 53 месяца – нормальная эксплуатация (производство и обслуживание) – 4,5 года; 2 – 25 месяцев – восстановление после аварий – 2 года; 3 – 54 месяца – административные задержки (включая 24 месяца общественных слушаний) – 4,5 года; 4 – всего 11 лет; 5 – январь – май – март – апрель – июль – март – июль – август – сентябрь – декабрь. Шкалы времени под рисунком (сверху вниз): 1 - 17 месяцев – 15 месяцев – 5 месяцев – 16 месяцев – всего 53 месяца; 2 – барабан хранения (10 месяцев) – очистка натрия (8 месяцев) - утечка аргона в теплообменнике (7 месяцев); 3 – административная задержка (13 месяцев) – административная задержка (16 месяцев) – публичные слушания (24 месяца) – административная задержка (1 месяц).

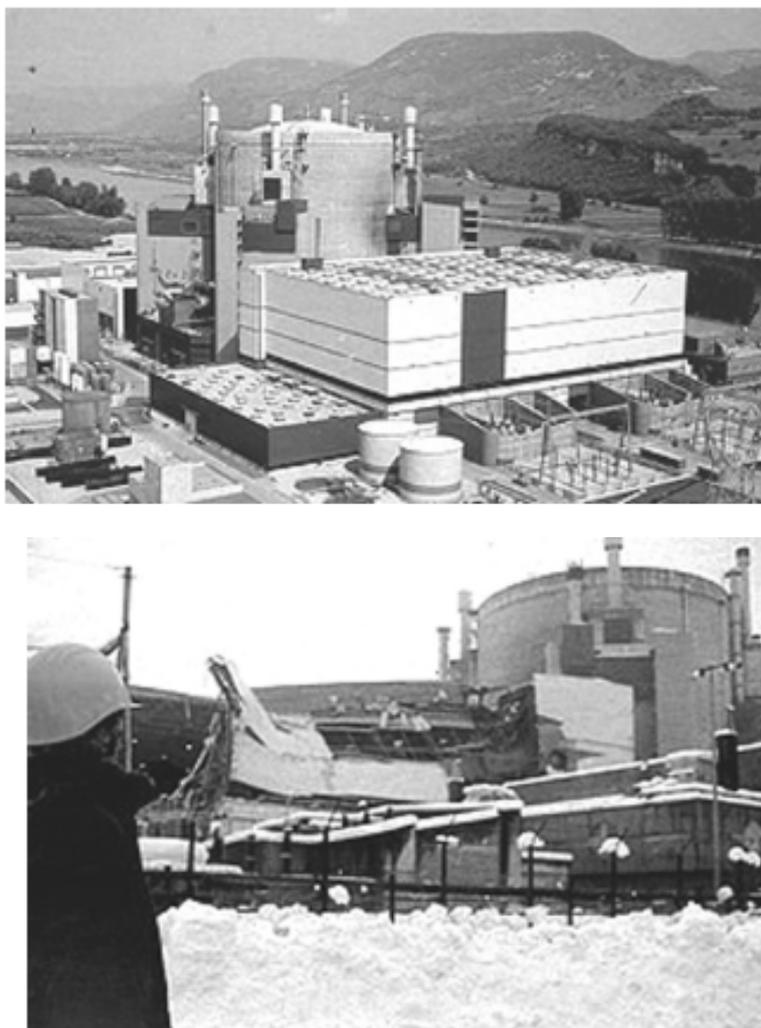


Рис. 4: Суперфеникс. Сверху турбинный зал на переднем плане. Снизу разрушенная крыша турбинного зала. Фото: Dissident-Media.

На рождество 1996 года «Суперфеникс» был закрыт для обслуживания, перестройки активной зоны и начала исследовательской программы по трансмутации. Однако, 28 февраля 1997 года Государственный совет аннулировал разрешение на эксплуатацию 1994 года и 19 июня 1997 года новый премьер-министр Жоспен заявил национальной ассамблее, что «Суперфеникс будет закрыт». Политическое решение стало официальным 2 февраля 1998 года, когда коммюнике совещания междуминистресского комитета объявило, что «правительство решило, что «Суперфеникс» не будет запущен снова, даже на ограниченный период времени».

Представитель партии зеленых впервые вошел в европейское национальное правительство на старшей министерской должности. Доминик Войне стала министром по охране окружающей среды, и поэтому стала принимать участие в надзоре за гражданской ядерной безопасностью вместе с министром промышленности. Первым пунктом в предвыборной платформе партии зеленых было закрытие реактора «Суперфеникс». Этот вопрос всегда был весьма символическим для оппонентов атомной энергии во Франции. После того, как партия зеленых вошла в правительство, было трудно представить чего-либо другого, чем конец проекта «Суперфеникс».

Однако, также совершенно ясно что по крайней мере часть высшего руководства компании EDF уже давно рассматривало «Суперфеникс» и переработку как дорогостоящую ошибку²².

Французские дипломаты быстро сгладили стратегическое значение конца «Суперфеникса». Посольство Франции в США заявило в своих «Ядерных заметках из Франции»²³:

«В свете последних решений, принятых французским правительством, включая закрытие реактора-размножителя на быстрых нейтронах «Суперфеникс», некоторым может показаться, что Франция изменяет свою ядерную политику. По существу, ответ на это отрицателен. Как премьер-министр Лионель Жоспен, так и министр промышленности Доминик Страус-Кан разъяснили, что Франция удовлетворена своим «разумным» ядерным обязательством, подчеркивая большой возврат инвестиций, который оно представляет в смысле экономической конкурентоспособности, самодостаточности и защиты окружающей среды. Франция будет придерживаться своей политики переработки и повторного использования плутония, хорошего способа оптимизации управления отходами и производства большего количества электроэнергии. Разве это удивительно? Просто вспомните, что каждый во Франции имеет в виду: отсутствие нефти, газа, и угля означает отсутствие выбора! Иногда это помогает!»

Постановление от 30 декабря 1998 года формализовало решение о продвижении к окончательному закрытию «Суперфеникса» и первых шагов по выводу из эксплуатации. На 2008 год топливо было выгружено и переведено в установку хранения АРЕС на площадке. Турбинный зал был освобожден. Разрешение на полный вывод из эксплуатации было выдано 20 марта 2006 года.

ВОЕННЫЙ ПЛУТОНИЙ ИЗ «ФЕНИКСА»

Военный департамент КАЭ проявлял острый интерес к РРБН на быстрых нейтронах из-за того, что, в качестве побочного продукта, они производят плутоний сверхвысокого качества в бланкетах реактора-размножителя²⁴. Хотя энергетические компании, вовлеченные в проект «Суперфеникс», всегда категорически отвергали идею связи с военными, очевидно, что «Феникс» использовался для производства плутония для французской программы ядерного оружия. Потенциальная милитаризация «Суперфеникса» вызывала заметные опасения, в особенности в Германии, и она обсуждалась в аспекте той возможности, что Франция может разработать и развернуть нейтронные бомбы в Европе²⁵.

В случае «Феникса», конструкция топлива позволяла не только использовать радиальный бланкет, но также и часть осевого бланкета для производства оружейного плутония. Обычно осевой бланкет интегрируется вместе с топливом активной зоны в тех же самых топливных стержнях, но кажется, что в случае «Феникса» верхний осевой бланкет отделен. Материал бланкета «Феникса» перерабатывается на военном заводе UP1 в Маркуле, в то время как материал активной зоны, разбавленный топливом газо-графитовых реакторов, перерабатывается в Ла Хаге и в специальном заводе в Маркуле (APM с линией SAP-TOP, позднее SAP-TOR).

В необычно резком заявлении генерал Жан Тири, бывший директор французских ядерных полигонов в Сахаре и на Тихом океане, который до этих должностей в течение восьми лет был ответственным в Комиссариате атомной энергии за «учет» плутония, заявил в 1978 году в интервью газете «Ле Монд»: «Франция способна изготавливать ядерное оружие всех типов и всех мощностей. Она будет способна изготавливать их в большом количестве, как только реакторы-размножители предоставят ей достаточное количество необходимого плутония»²⁶. В 1987 году генерал Тири подтвердил это заявление и объявил: «Всегда можно получить плутоний, в особенности, если разработать Очевидно, что это идея, которую нельзя высказать [открыто], потому что это аморально²⁷, но я защищаю Крез-Малвилль [Суперфеникс] и тип РРБН, потому что вы имеете плутоний исключительного военного качества.»²⁸.

Доминик Финон заявила, что «Феникс» использовался для военных целей, начиная с 1978 года, но что идея использовать «Суперфеникс» для оборонных нужд была оставлена в 1986 году²⁹.

РАСХОДЫ (ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ, СТРОИТЕЛЬСТВО, ЭКСПЛУАТАЦИЯ, И ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ)

Программа РРБН дорого обошлась французским налогоплательщикам. Подробная историческая экономическая оценка недоступна. Был проведен детальный анализ до середины 1980-х годов³⁰ и национальный суд аудиторов предоставил оценку расходов в 1996 году.

Кроме того, было проведено несколько оценок, направленных на специфические аспекты (исследования и разработки, вывод из эксплуатации, ...). на рис. 5 представлена сводка эксплуатационных расходов на «Феникс» между 1972 и 2003 годами.

Между 1973 и 1986 годами только КАЭ потратил 15,8 миллиарда недисконтированных франков (3,8 миллиарда долларов 2008 года) на исследования и разработки по реакторам-размножителям, на 50% больше, чем по легководным реакторам (включая разработку реактора EPR)³¹.

В соответствии с соглашением, подписанным в 1969 году, КАЭ предоставлял 80%, а компания EDF 20% расходов на строительство и эксплуатацию реактора «Феникс». Расходы на строительство составили 800 миллионов франков 1974 года (880 миллионов долларов 2008 года). Около 600 миллионов евро (950 миллионов долларов 2008 года) было потрачено на модернизацию «Феникса» между 1997 и 2003 годами (см. рис. 5).

Между 1960 и 1986 годами французское государство потратило на программу РРБН около 44 миллиардов франков 1985 года (17,4 миллиарда долларов 2008 года). Расходы на строительство «Суперфеникса» увеличились на 80%, достигнув 26 миллиардов франков 1985 года (9,5 миллиардов долларов 2008 года) в то время, когда реактор вошел в строй в 1986 году³². В это время рассчитанное КАЭ отношение вложенных средств на установленный киловатт между реактором-размножителем и реактором с водой под давлением равнялось 2,58³³.

Суд аудиторов в своем годовом отчете 1996 года предоставил оценку стоимости «Суперфеникса», предполагая, что он будет работать до конца 2001 года. Он оценил, что энергоблок в конце 1994 года стоил 34,4 миллиарда франков, и что расходы на финансирование, управление отработанным топливом, вывод из эксплуатации, и управление отходами составят дополнительные 27,4 миллиарда франков. Эксплуатационные расходы составляли 1,7 миллиарда франков в год. Учитывая то, что энергоблок был выключен в конце 1996 года, добавляя два года эксплуатационных расходов, а также генерацию электроэнергии (около 3,65 ТВт·час), полная оцениваемая стоимость должна составлять около 64 миллиардов франков, минус примерно один миллиард франков, полученный за произведенную электроэнергию³⁴. Жак Шовен, президент директората компании NERSA, заявил, что «в целом, суммируя инвестиции и эксплуатационные расходы, и принимая во внимание все будущие расходы, «Суперфеникс» будет стоить 65 миллиардов франков, из которых компания EDF уплатила 38 миллиардов»³⁵.

Суммы компании NERSA и суда аудиторов совпадают в пределах неопределенности оценок. В частности, расходы на вывод из эксплуатации содержат существенную потенциальную возможность ошибки. Они были увеличены в несколько раз. На 2003 год суд аудиторов оценивал расходы на выводе из эксплуатации и управление отходами как 2,081 миллиарда.

Парламентский комитет по расследованию заключил:

«В конце никто не старался оспаривать решение суда [аудиторов] о том, что история опыта реактора-размножителя на быстрых нейтронах сегодня кажется неблагоприятным в любом случае в финансовом смысле.» Кристиан Пьерре [государственный секретарь по промышленности] пошел еще дальше, квалифицируя ее как неприемлемую.»³⁶

ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ ВО ФРАНЦУЗСКОЙ ПРОГРАММЕ РРБН

Все три реактора, «Рапсодия», «Феникс» и «Суперфеникс», встретились со значительными проблемами безопасности во время запуска, эксплуатации и демонтажа, включая утечки натрия, аварии со скачками реактивности, взрывы и разрушение материалов.

Рапсодия – утечки натрия и взрыв со смертельным исходом

После довольно спокойного периода эксплуатации реактора «Рапсодия» от его запуска в начале 1967 года, в конце 1978 года была обнаружена небольшая утечка первичного натрия, которая привела к решению уменьшить эксплуатационную мощность с 40 до 22 МВт-тепл. В январе 1982 года была обнаружена другая небольшая утечка натрия в азотной системе (окружающей первичный бак). Было решено, что локализация утечки будет слишком дорогой и слишком неопределенной. Поэтому 13 октября 1982 года реактор был выключен.

Вторичный натрий был слит в апреле 1983 года, и он все еще хранится на площадке в Кадараше. Первичный натрий был слит в апреле 1984 года. потребовалось два года для того, чтобы извлечь из бака 468 сильно облученных сборок рефлектора, окружающих активную зону (222 сделаны из никеля, 246 – из стали), промыть их для удаления следов натрия и установить их в контейнере хранения. 37 тонн первичного натрия были обработаны в специально созданной установке (DESORA) и преобразованы в 180 кубометров концентрированной гидроокиси натрия.

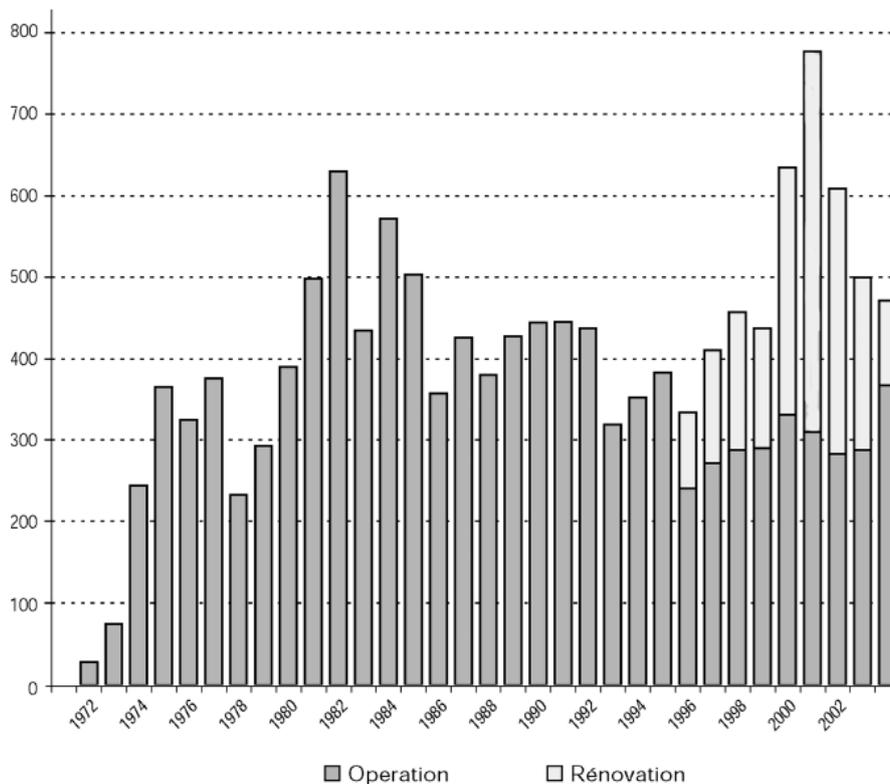


Рис. 5: Эксплуатационные расходы «Феникса» в миллионах франков 2000 года. Источник: Sauvage 2004. Легенда под рисунком (слева направо): 1 - эксплуатация; 2 – модернизация.

31 марта 1994 года³⁷ произошел взрыв во время очистки от остаточного первичного натрия, содержащегося в баке, размещенном в зале вне здания удержания. Опытный высококвалифицированный 59-летний инженер КАЭ погиб на месте, четыре человека были ранены. Около 100 кг остаточного натрия оставалось на дне бака в конце кампании обработки. Выводы из аварии приводятся ниже:

«Процесс, выбранный для выполнения этой очистки, состоял в постепенном введении в бак тяжелого спирта, этилкарбитола, с мониторингом реакции по измерениям температуры, давления, концентрации водорода и кислорода. Основной причиной аварии было образование гетерогенной физико-химической сложной и многофазной окружающей среды, состоящей из трех базовых составляющих: спирта, алкоголята и натрия. Эта среда оказалась особенно благоприятной для развития реакции теплового разложения и (или) каталитических экзотермических реакций. Поэтому образовалось большое количество газов (включая водород и легкие углеводородные соединения). Вскоре после последней инъекции спирта 21 марта явление вышло из-под контроля, что привело к внезапному разрыву бака под избыточным давлением и затем к взрыву газовой смеси, вырвавшейся в зал.»³⁸

После этого инцидента использование этилкарбитола или другого тяжелого спирта при обработке натрия было запрещено. Но обстоятельства аварии стали предметом продолжающегося юридического диспута. В 2001 году эксперт анализа, заказанного судом, обвинил КАЭ, Институт ядерной защиты и безопасности (IPSN, предшественник IRSN), и органы безопасности в «ошибках из-за неосмотрительности, небрежности и нарушения правил тех-

ники безопасности»³⁹. В марте 2009 года еще не было опубликованной информации, указывающей на то, что это было окончательным решением.

Феникс – утечки натрия и скачки реактивности

К 1988 году «Феникс» имел средний кумулятивный фактор нагрузки в 60,5 процентов. Однако, эксплуатация проходила не без проблем. Первая утечка топливного стержня произошла в июне 1974 года, утечки вторичного натрия случались в сентябре 1974 года, марте и июле 1975 года (около 20 литров в каждом из двух первых случаев, и 1 литр в последнем). «Утечка обычно приводила к медленному спонтанному горению этого натрия внутри изоляции, без инициирования пожаров за пределами изоляции»⁴⁰. Ремонтные операции оказались неэффективными и клапаны в трех вторичных системах в конце концов были заменены на диафрагмы.

11 июля 1976 года произошла утечка натрия в промежуточном теплообменнике (между первичным и вторичным натриевыми контурами), которая привела к тому, что позже назвали «первым настоящим натриевым пожаром на станции Феникс». Пожар был потушен вручную. 5 октября 1976 года возник второй пожар в промежуточном теплообменнике и он снова был поставлен под контроль вручную. На рис. 6 показана иллюстрация воздействия пожара натрия в не идентифицированную дату. Следующая утечка натрия была обнаружена в августе 1977 года. В 1980-х годах были идентифицированы дальнейшие утечки вторичного натрия, включая аварии в марте и ноябре 1994 года и в сентябре 1988 года.

В июле 1976 года у двух контрольных стержней было обнаружено распухание, которое не позволило нормально извлекать их из направляющих труб. Однако, поскольку блокировка располагалась выше уровня погружения во время нормальной работы, это явление не сочли составляющим немедленную угрозу безопасности.

В первые годы ни одно из событий не повлияло непосредственно на парогенераторы. Отказы парогенераторов, которые могут привести к бурным реакциям воды и натрия, относятся к наиболее потенциально опасным авариям на реакторах на быстрых нейтронах. Но в окружении парогенераторов имели место различные инциденты, включая четыре утечки воды во впуске экономайзера-испарителя парогенераторов между ноябрем 1975 года и сентябрем 1976 года.

Первое разрушение оболочки было обнаружено в мае 1979 года. Оно привело к «самому большому выбросе газообразного продукта деления (ксенона-135), когда либо наблюдавшемуся на станции Феникс».

Между апрелем 1982 года и мартом 1983 года реакции между натрием и водой в ступенях промежуточного подогревателя повлияли на три парогенератора по крайней мере в четырех инцидентах. В первом случае в апреле 1982 года около 30 литров воды протекло в натрий и привело к горению с пламенем, которое прожгло отверстие в двух трубах и повредило оболочку модуля промежуточного подогревателя. Другие три события, по-видимому, вовлекали количества воды, ограниченные несколькими литрами. Эти четыре инцидента с водой и натрием привели к общему простою в шесть месяцев и работе на ограниченной мощности (две трети от номинальной) в течение девяти месяцев.

Самыми дорогими и потенциально наиболее значительными инцидентами были быстрые скачки реактивности в активной зоне в трех случаях в 1989 году (6 и 24 августа, 14 сентября) и 9 сентября 1990 года. Несмотря на исследовательскую программу, стоившую сотни миллионов франков, 200 человеко-лет работы и разработку около 500 документов, причина явления никогда не была окончательно идентифицирована.

События были особенно тревожными потому, что вслед за падением реактивности и мощности от 28% до 45% в течение 50 миллисекунд мощность возрастала, превышая мощность в начальном состоянии реактора. Опасались, что такое событие может вызвать выброс мощности. Причина могла заключаться в прохождении аргонового пузыря через активную зону, но эта гипотеза никогда не была подтверждена. Последующие исследования выявили, что аналогичные события происходили в апреле 1976 года и июне 1978 года, и что объяснения того времени (проскальзывание управляющих стержней) было неправильным.

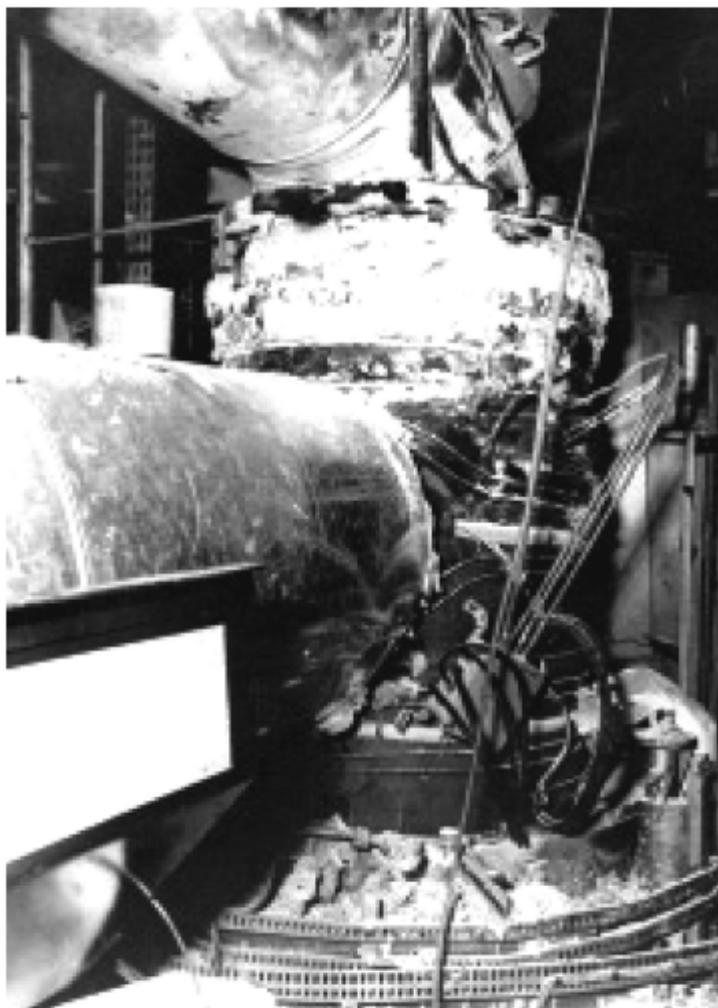


Рис. 6: Теплообменник «Феникса» со снятой изоляцией после пожара натрия. Фото: Sauvage 2004.

Суперфеникс – утечки натрия и ракетные атаки

Опасения по безопасности, относящиеся к эксплуатации реактора «Суперфеникс», были ключевым возражением критиков проекта с его самых ранних стадий. Более 5000 тонн сильно реагирующего натрия вместе с несколькими тоннами высокотоксичного плутония поднимали многочисленные вопросы безопасности. После аварии в Чернобыле, которая произошла всего через три месяца после подсоединения «Суперфеникса» к сети, вопрос положительного коэффициента реактивности из-за пустот⁴¹, присущего конструкции и теоретически благоприятствующего авариям с выбросом мощности, только увеличил сомнения многих ученых критиков. Соображения безопасности сыграли значительную роль в создании оппозиции, включая ее наиболее экстремальные формы.

Первое примечательное событие произошло в Крез-Малвилле до того, как закончилось строительство реактора. Группа антиядерных активистов сумела достать гранатомет РПГ-7 и восемь гранат у немецкой террористической организации RAF («Фракция красной армии») через ее бельгийского аналога ССС («Ячейки коммунистических комбатантов»). 18 января 1982 года по строительной площадке «Суперфеникса» были выпущены пять гранат (три других гранаты были забракованы до нападения). Материальных повреждений было немного, но политическое значение и внимание средств массовой информации было большим. Нападавшие никогда не были пойманы до саморазоблачения основного участника, Хаима Ниссима, через 22 года⁴².

Внутренняя база данных по инцидентам органов французской ядерной безопасности ссылается только на одно событие в течение эксплуатационного периода «Суперфеникса»:

Комитет расследования национальной ассамблеи по «Суперфениксу» и линии РРБН⁴³ также обсуждал три упоминавшихся ранее существенных события: загрязнение натрия в июле 1990 года, провал крыши турбинного зала в декабре 1990 года и утечку аргона в декабре 1994 года.

В настоящее время на реакторе «Суперфеникс» проводятся различные операции вывода из эксплуатации. Планируется начать демонтаж блока реактора в 2014 году и закончить его через 8 лет. Вся установка будет демонтирована в 2025 году.

«После четырех десятилетий исследований и разработок, проектирования и эксплуатации реакторов-размножителей на быстрых нейтронах с жидкометаллическим охладителем, и при отсутствии нового проекта, КАЭ и компании EDF и FRAMATOME-ANP [теперь AREVA NP] решили в 2000 году сохранить базу знаний по РРБН с жидкометаллическим охладителем»⁴⁴.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Германия, Франция, Бельгия, Италия, Швеция, Австрия, Дания, Норвегия, Нидерланды, Швейцария, Португалия, Турция и Испания присоединились к консорциуму в 1959 году. Большинство этих стран в какой-то период времени имели программы по ядерному оружию, включая Германию, Италию, Швецию и Швейцарию.
2. IAEA, *Fast Reactor Database—2006 Update*, IAEA-TECDOC-1531, December 2006, see <http://www-frdb.iaea.org/index.html>.
3. Через два месяца после последнего заказа на реактор из США, который не был впоследствии аннулирован.
4. IAEA, *Fast Reactor Database—2006 Update*, IAEA-TECDOC-1531, December 2006, see <http://www-frdb.iaea.org/index.html>.
5. Согласно IAEA PRIS, не включая годы с 1997 по 2004, смотрите <http://www.iaea.org/cgi-bin/db.page.pl/pris>.
ophis.htm?country=FR&site=PHENIX&units=&refno=10&op
year=2007&link=HOT.
6. Journal Officiel, 23 December 1972.
7. Centrale Nucleaire Europeenne a Neutrons Rapides S.A.
8. Постановление от 13 мая 1974 года уполномочило EDF принять участие в консорциуме. Первоначальными акционерами, кроме EDF (51%), были ENEL, Италия (33%) и RWE, Германия (16%).
9. Robert Galley, Christian Bataille, Rapport fait au nom de la Commission d'Enquete sur Superphenix et la filiere des reacteurs a neutrons rapides, enregistre a l'Assemblee Nationale, 25 June 1998.
10. Schnellbruterkerkraftwerksgesellschaft: 68,85% RWE, 14.75% SEP (консорциум голландских электростанций), 14.75% Electronucleaire (консорциум бельгийских электростанций), 1.65% CEGB (Великобритания).
11. Jean-Louis Fensch [инженер CEA], Finalites du retraitement, unpublished annex to the First "Castaing Report," commissioned by the Conseil Superieur de la SHrete Nucleaire, October 1982.
12. Robert Galley, Christian Bataille, Rapport fait au nom de la Commission d'Enquete sur Superphenix et la filiere des reacteurs a neutrons rapides, enregistre a l'Assemblee Nationale, 25 June 1998.
13. Там же.
14. Jean-Louis Fensch [инженер CEA], Finalites du retraitement, unpublished annex to the First "Castaing Report," commissioned by the Conseil Superieur de la SHrete Nucleaire, October 1982.
15. Там же.

16. *Time* magazine, 18 February 1980.
17. *Le Point* magazine, 19 September 1977, цитировано в [Fensch, 1982].
18. Jean-Louis Fensch [инженер КАЭ], Finalites du retraitement, unpublished annex to the First "Castaing Report," commissioned by the Conseil Superieur de la SHrete Nucleaire, October 1982.
19. IAEA, *Nuclear Power Reactors in the World*, April 1987 edition.
20. Mycle Schneider (Dir.), Xavier Coeytaux, Recyclage des matieres nucleaires - Mythes et realites, WISE-Paris, commissioned by Greenpeace France, May 2000.
21. Статус коммерческой или промышленной эксплуатации должен рассматриваться как достигнутый, если реактор работал на более, чем 60% номинальной мощности в течение по крайней мере месяца, из которых по крайней мере одна неделя была непрерывной.
22. Автор был советником офиса министра по защите окружающей среды Франции с 1998 по 2002 год. В 1998 году одним из пяти главных директоров EDF обратился к автору с запросом направить Доминик Воине сообщение, что, хотя EDF не могло сделать никакого публичного заявления, она должна знать, что у нее имеется значительная поддержка в EDF. Хотя Воине стала идеальным козлом отпущения для плутониевого лобби, она была секретным союзником тех лиц в ядерном истеблишменте, которые хотели прекращения деятельности по реакторам-размножителям на быстрых нейтронах и плутонию.
23. Embassy of France in the US, *Nuclear Notes from France* n°52, Jan, Feb, March 1998.
24. Радиальные элементы реактора-размножителя и осевой бланкет содержали уран-238, который «размножал» плутоний-239 в очень чистой форме. Плутоний «очень высокого качества» с долей расщепляющегося плутония более 97% (плутония-239 и плутония-241) в особенности хорошо приспособлен для ядерного оружия.
25. Если Франция решит производить нейтронные бомбы в больших количествах, то мало сомнений в том, что она не сможет производить достаточно плутония оружейного качества без перевода на военные цели дополнительных реакторов, помимо двух тяжеловодных реакторов *Celestin* и реактора *Phenix*.
26. *Le Monde*, 19 January 1978.
27. Сегодня можно сказать «политически корректных».
28. Интервью с автором, 18 июня 1987 года, неопубликовано.
29. Dominique Finon, *L'echec des surgenerateurs, autopsie d'un grand programme*, PUG 1989, p. 176.
30. Dominique Finon, *L'echec des surgenerateurs, autopsie d'un grand programme*, PUG 1989.
31. За подробностями обращайтесь к Mycle Schneider (dir), *Research and Development Expenditure on Nuclear Issues in France 1960-1997*," commissioned by Energy Services, Lohmar, Germany, February 1998.
32. Эта сумма включает финансовые расходы в 7,5 миллиардов франков и проектирование, так же как и предэксплуатационные расходы примерно в 2 миллиарда франков, покрытые EDF, помимо прямых инвестиционных расходов, указанных Комиссариатом по атомной энергии как 16,5 миллиардов франков (смотрите Dominique Finon, *L'echec des surgenerateurs, autopsie d'un grand programme*, PUG 1989, footnote 84, p. 305).
33. CEA, Coûts de la centrale SuperPhenix, Note BRPC 86.317, January 1986, цитировано в Dominique Finon, *L'echec des surgenerateurs, autopsie d'un grand programme*, PUG 1989.
34. Суд аудиторов предположил среднюю цену в 0,25 франка за киловатт-час, которая может означать кредит менее 1 миллиарда франков при генерации 3,65 ТВт-час.
35. Robert Galley, Christian Bataille, Rapport fait au nom de la Commission d'Enquete sur Superphenix et la filiere des reacteurs a neutrons rapides, enregistre a l'Assemblee Nationale, 25 June 1998.
36. Там же.
37. Также дата окончательного выключения реактора PFR в Донре.
38. G. Rodriguez et al., *General Review of the Decommissioning of Liquid Metal Fast Reactors (LMFRs) in France, in Operational and decommissioning experiences with fast reactors*, TECDOC 1405, IAEA, August 2004.
39. *Liberation*, 15 March 2007.
40. Если только не указано иное, цитаты в этом разделе взяты из Jean-Francois Sauvage, *Phenix, 30 Years of History - The Heart of a Reactor*, CEA-EDF, May 2004. Книга бесплатно доступна по адресу <http://www.iaea.org/inisnkm/nkm/aws/fnss/phenix/book/index.html>

41. Положительный коэффициент реактивности из-за пустот возникает, когда пузырек в активной зоне увеличивает его реактивность.
42. Хайм Ниссим играл ключевую роль в приобретении и запуске ракет на строительной площадке реактора *Superphenix*. Он описал процесс приобретения и нападения в книге: *Lamour et le monster—Roquettes contre Creys-Malville*, Ed. Favre, Geneva, February 2004.
43. R. Galley, C. Bataille, Rapport fait au nom de la Commission d'Enqu^{****}ete sur Superphenix et la filiere des reacteurs a neutrons rapides, enregistre a l'Assemblee Nationale on 25 June 1998.
44. F. Baque, R&D LMFRs Knowledge Preservation French Project, CEA, Saint-Paul-Lez Durance Cedex, France in operational and decommissioning experiences with fast reactors, TECDOC 1405, IAEA, August 2004.