

**АБУБЕКЕРОВ Р.А. ДОМАШЕВ В.Е., ДОМАШЕВ Е.Д.,
КАРЕЛИН А.И., КАРЕЛИН. В.А.**

ЯДЕРНАЯ И СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА – ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Рассмотрены проблемы, препятствующие развитию одного из перспективных источников энергии – ядерной энергетики. Проблемы ядерной энергетики сложны и требуют научного и финансового обеспечения. Попытки решения этих проблем политическим путем только дискредитируют передовую энерготехнологию в глазах мировой общественности. Развитие солнечной энергетики сдерживается высокой стоимостью полупроводникового кремния и загрязнением окружающей среды при его производстве. Предложен конкурентоспособный способ промышленного производства полупроводникового кремния.

В научной литературе [1-4, 7-10], на различных отечественных и зарубежных конференциях авторы настоящей статьи рассматривали проблемы развития и использования одного из перспективных источников энергии – ядерной энергетики. К сожалению, за последнее время, после всплеска в создании мощностей в 1960-1970 г.г. и достижения электрических мощностей на уровне 350-400 ГВт, в мире не произошло каких-либо серьезных изменений перспектив развития ядерной энергетики.

Правда, администрацией Буша наконец-то, после длительного перерыва в строительстве атомных станций, принята программа, предусматривающая строительство в ближайшие 20 лет крупных атомных станций нового поколения. В Китае, Южной Корее и Японии намечается рост мощностей ядерной энергетики. В России на ближайшие 20 лет принята программа строительства новых атомных станций. Однако если учесть, что более 199 атомных электростанций из 352 действующих в мире приближаются к предельному сроку своей эксплуатации, составляющему около 30-40 лет, то становится ясным, что вряд ли человечеству удастся за ближайшее время преодолеть барьер

20 % доли ядерных мощностей в энергообеспечении общества. Причина такого застоя в использовании одного из перспективных источников энергии состоит в следующем. **Во многих странах мира развитие ядерной энергетики происходит не за счет использования научных достижений и решения проблем, сдерживающих ее развитие, а за счет политического лоббирования** отдельными группами ученых и специалистов. Удастся пролоббировать строительство АЭС – развитие идет (США, Япония, Китай, Россия и др.), не удастся (например, в Германии, Украине) – не только развитие, а даже достигнутый уровень ядерных мощностей не сохраняется, а уменьшается.

В результате, в мире формируются две основные модели [5] развития атомной энергетики в XXI веке. **Первая модель рассматривает развитие современной атомной энергетики в крупномасштабную энерготехнологию.** Эта модель характеризуется замкнутым ядерным циклом, практически полным ограничением

радиоактивных выбросов за границы системы, радиационно-эквивалентным захоронением радиоактивных отходов в геологических формациях, существенным уменьшением риска несанкционированной утечки ядерных материалов, надежным избавлением от накопившихся оружейных материалов, т.е. модель характеризуется решением всех проблем атомной энергетики. **Замкнутый топливный цикл является обязательным условием крупномасштабной ядерной энергетики [1-10].** Эта модель характерна для стран с высоким уровнем развития науки и конкретных достижений в области атомной энергетики [3]. Так, в США, России, Японии получены обнадеживающие результаты по созданию жидкосолевых ядерных реакторов с уран-ториевым циклом [2], Россия близка к созданию быстрого реактора со свинцовым теплоносителем [9]. Цель создания новых концепций ядерных реакторов – достижение естественной безопасности, основанной на отказе от приоритета технических средств в пользу использования пассивных средств обеспечения безопасности и минимизации внутренне присущих реактору (естественных) факторов опасности.

Вторая модель предполагает консервацию атомной энергетики, т.е. ограниченное развитие на реакторах современных типов. Эта модель характерна, в основном, для европейских стран, где разработан целый спектр прекрасных современных реакторов, таких как [6]:

- реактор №4 (Франция) – 1500МВт;
- реактор ABWR (General Electric) – 1400МВт;
- реактор EPR (Франко-Германский) – 1750МВт;
- реактор ER – 1000МВт (Европейский вариант Westinghouse);
- реактор SWR – 1000МВт (Siemens);
- реактор BWR 90 – 1500МВт (Швеция-Финляндия) и др.

При этом европейские специалисты считают, что эти реакторы используют технические решения, обеспечивающие в совокупности практическую безопасность, поэтому дальнейшее развитие ядерных энерготехнологий можно перенести на “лучшие” времена. И это более, чем удивительно, так как **ни одна из злободневных проблем современной атомной энергетики не может быть решена в рамках этой модели.** Тем не менее модель "консервации", т.е. ограниченное развитие атомной энергетики на реакторах современных типов, находит поддержку.

К настоящему времени ни в одной стране мира не осуществлено полное замыкание уран-плутониевого топливного цикла в ядерной энергетике. При детальном рассмотрении вопроса видно, что уран-плутониевый топливный цикл, а также известный уран-ториевый топливный цикл не замыкаются ни по урану, ни по плутонию, ни по трансплутониевым элементам. В мире по-прежнему происходит накопление делящихся и радиоактивных материалов даже при невысоком достигнутом уровне ядерных мощностей [2].

В табл. 1 приведен прогнозируемый рост накопления указанных материалов за период 1990-2050 г.г.

Таблица 1. Накопление делящихся и радиоактивных материалов за период 1990-2050 г.г.

Наименование материала	Количество, т	Количество, т (при 4 ^х рециклах)
Энергетический плутоний	4800	1356
Америций	85	15,2
Кюрий	23	42,9
Нептуний	270	270
Уран (смесь изотопов U ²³² , U ²³⁴ , U ²³⁵ , U ²³⁶ , U ²³⁸)	600 000	40 000
Долгоживущие продукты деления: Тс ⁹⁹ (T _{1/2} –2,13·10 ⁵ лет) I ¹²⁹ (T _{1/2} –10 ⁷ лет)	500 7·10 ¹⁴ Бк	500 7·10 ¹⁴ Бк
Уран отвалный	2 712 000	181 000

Возникает вопрос: что делать с этими материалами?

В мире существует два направления обращения с полученными веществами. Первое – многократная радиохимическая переработка отработавшего ядерного топлива, извлечение и сжигание в рециклах делящихся нуклидов в реакторах на тепловых нейтронах. Однако таких реакторов к настоящему времени не создано. В ряде стран (Франция, Япония и др.) имеются реакторы на тепловых нейтронах, частично, на 30 % своей загрузки работающие на смешанном уран-плутониевом топливе 1^{го} рецикла (МОХ-топливо I). Ядерных реакторов, работающих на МОХ-топливе, полученном при переработке ОЯТ различных рециклов не существует, поэтому нет оснований говорить о возможности извлечения и сжигания делящихся материалов в ядерных реакторах с тепловыми нейтронами. Кроме того, расчеты, результаты которых приведены в табл. 1, показывают, что сжигание делящихся материалов в 4^х рециклах (что на практике вряд ли осуществимо) не приводит к полному сжиганию делящихся материалов. При этом по-прежнему происходит накопление большого количества радиоактивных материалов с очень сложным изотопным составом плутония, урана и долгоживущих продуктов деления [2,7,8].

Второе направление – полное сжигание всех тяжелых радиоактивных элементов в ядерных реакторах на быстрых нейтронах. **К настоящему времени ядерных реакторов на быстрых нейтронах для полного сжигания тяжелых радиоактивных элементов, образующихся в ядерных реакторах на тепловых нейтронах, не создано.** Ядерные реакторы на быстрых нейтронах, предназначенные для сжигания только части тяжелых радиоактивных элементов, оказались неконкурентноспособными. Стоимость электроэнергии, производимой ядерными реакторами на быстрых нейтронах, оказалась в несколько раз выше, чем при сжигании органического топлива.

Не получил также практического подтверждения способ трансмутационного уничтожения средне- и долгоживущих продуктов деления Sr, Cs, РЗМ, I¹²⁹ и Тс⁹⁹, образующихся при нейтронном делении тяжелых ядер в ядерном топ-

ливном цикле. Вряд ли мировая общественность положительно воспримет пропагандируемый учеными и специалистами НАТО, Франции и др. стран метод обращения с радиоактивными отходами ядерной энергетики, который предусматривает их остекловывание и глубинное захоронение в недрах Земли.

В настоящее время в России ведется разработка нового способа переработки отработавшего ядерного топлива на основе фторидной технологии [7,8]. Это позволит уже в ближайшем будущем осуществлять переработку ОЯТ непосредственно на каждой АЭС. При этом не образуется жидких радиоактивных отходов, а получаемые фториды различных радионуклидов хорошо и дешево хранятся и могут быть использованы для получения необходимых в народном хозяйстве изотопов.

По данным МАГАТЭ ежегодные инвестиции в исследования и разработки только ядерных реакторов растут и достигли 2 млрд. \$ США, но главная проблема обращения с отработавшим топливом и полного замыкания ядерного топливного цикла не решена. **Все это говорит о том, что проблемы ядерной энергетики сложны и требуют научного и финансового обеспечения.**

Анализ статистических данных показывает, что интервал времени появления новых значимых технологий оценивается величиной около 50 лет. Масштаб же времени для выхода той или иной технологии на лидирующие позиции в производстве энергии составляет более ста лет. Ядерная энерготехнология находится в начале своего пути развития и по разным прогнозным оценкам максимальный уровень ее использования предполагается в конце XX1- начале XX11 века. Поэтому политическим путем решать стратегические задачи атомной энергетики невозможно, так как для этого необходимо обладать профессиональным видением на 50-100 и более лет.

В Украине атомная наука не востребована, а отсутствие ее финансирования ведет к падению профессионализма. К 2020 году все АЭС Украины вырабатывают свой ресурс и Украина может превратиться в страну 17 “Саркофагов”. Поэтому для Украины не так важно количество атомных электростанций, как возможность организации научного обеспечения продления ресурса их безопасной эксплуатации. И это важнейшая стратегическая задача.

Серьезным альтернативным источником энергии для Украины может стать солнечная энерготехнология. Солнце является одним из наиболее привлекательных экологически чистых альтернативных источников энергии. Полная солнечная энергия, падающая на Землю, составляет $1,8 \cdot 10^{17}$ Вт. С учетом поглощения и рассеяния в атмосфере достигает поверхности Земли $1,3 \cdot 10^{17}$ Вт. Это почти в 30 000 раз превышает сегодняшний уровень энергопотребления всего человечества. Солнечная энергетика – самая молодая отрасль энергетики. Первая солнечная батарея была разработана в конце 70^х годов XX века американской фирмой Bell.

К началу 80^х годов мощность всех систем солнечной энергетики в мире составляла всего лишь 4 МВт. Однако, в последнее время положение с развитием солнечной энергетики резко изменилось в сторону ее увеличения.

Темпы развития мирового рынка систем солнечной энергетики в период с 1990 по 1997 г.г. составляли 12 – 15 % в год. С 1997 г. темпы развития возросли

до 27 %. За один 1999 г. в мире было смонтировано систем солнечной энергетики общей мощностью более 270 МВт, что соответствует 37 %-му росту. В 2001 г. объем рынка систем солнечной энергетики составил 650 МВт.

Согласно опубликованным за рубежом прогнозам **продажи солнечных элементов в мире в ближайшие 5 лет ежегодно будут расти на 30-40 %**. Столь стремительные темпы роста связаны с принятием рядом стран стимулирующих программ развития систем солнечной энергетики. Прежде всего, такие программы приняты в Японии, Германии, США и Австралии, где солнечной энергетике уделяется особое внимание. Так, в 1995-1997 г.г. продажи элементов солнечных батарей в Японии росли ежегодно примерно на 30-40 %. В ближайшие годы спрос на указанные изделия в этой стране возрастет в 3-4 раза.

Высокоочищенный кремний – основной полупроводниковый материал, используемый в современной полупроводниковой технике [10]. Ежегодное мировое производство поликристаллического полупроводникового кремния (ППК) за последние 5 лет увеличилось в 2 раза и достигло 24 тыс. т в год, при этом ежегодный прирост производства и потребления полупроводникового кремния превышает 2 тыс. т.

Темпы роста солнечной энергетики и силовой полупроводниковой техники сдерживаются в настоящее время двумя причинами. **Хлоридная технология производства, по которой производится большая часть ППК, экологически грязная, а себестоимость производства слишком высокая**. Себестоимость производства ППК на лучших зарубежных фирмах составляет от 21,6 до 42,8 \$/кг [10], поэтому цена создания систем солнечной энергетики также высока. Усилия ученых и специалистов должны быть направлены на разработку и создание экологически чистой технологии производства ППК с выпуском дешевого ППК солнечного сорта со стоимостью менее 10 \$ США/кг.

В настоящее время в России и Украине собственного производства ППК нет. Из-за технической сложности и дороговизны обеспечения экологической чистоты производства по общепринятой большинством стран хлоридной технологии все попытки создания крупного производства по выпуску ППК в г. Таш-Кумыр (Киргизия), на Красноярском заводе цветных металлов, в Красноярске-26, на Подольском химико-металлургическом заводе не увенчались успехом. **С таким подходом к созданию и развитию солнечной энергетики Россия и Украина могут оказаться далеко позади развитых стран как это было с производством электроники, компьютерной техники, генетики и других прогрессивных направлений развития промышленности**. Как исключение, одна украинская компания “Solar KW” оценила преимущества солнечной энергетики и быстро организовала изготовление, монтаж и наладку систем бесперебойного энергообеспечения на основе энергии Солнца с использованием в качестве исходного сырья покупного ППК зарубежного производства. Суммарная мощность выпускаемых солнечных батарей составляет до 10 МВт в год. Мощность единичного фотоэлектрического солнечного модуля от 50 до 360 Вт. Среднедневное значение энергии, получаемой с одного квадратного метра солнечных модулей для широты 50°, представлено в табл. 2.

Таблица 2. Среднедневное значение энергии, получаемой с одного квадратного метра солнечных модулей для широты 50°

Время года	Получаемая энергия, Вт
Лето:	
– солнечный день	900
– пасмурный день	450
Зима:	
– солнечный день	500
– пасмурный день	300

На рис. 1 приведены зависимости производства и потребления ППК для обеспечения роста производства солнечных электрических мощностей.

Из рис. 1 видно, что для создания 100 000 МВт электрических мощностей солнечной энергетики необходимо обеспечить выпуск $2,0 \cdot 10^6$ т ППК. Это очень большое производство, почти в 100 раз превышающее достигнутый уровень мирового производства ППК. **Организовать выпуск таких огромных количеств ППК по экологически грязной хлоридной технологии невозможно.**

Компания Energy Conversion Devices (ECD) использует тонкопленочные вакуумные напыления аморфных кремниевых сплавов вместо кристаллических полупроводников. Аморфный кремниевый сплав поглощает свет более эффективно, чем его кристаллический соперник, таким образом, толщина солнечной батареи может быть в 100-200 раз меньше, что в свою очередь значительно снижает затраты на материалы. Напыление тонкопленочных покрытий также требует значительно меньших затрат, чем производство кристаллических солнечных батарей.

Фторидные процессы в технологии редких металлов (урана) нашли промышленное применение только в атомной промышленности [7-9]. Однако, закрытость этой отрасли до последнего времени тормозила возможности использования достижений в области фтора и фторидов урана в развитии фторидных технологий других редких металлов и кремния [10].

Авторами [11] разработан и запатентован экологически чистый способ производства ППК методом фторирования кварцевого песка обратным элементарным фтором с последующим электролитическим разложением тетрафторида кремния в расплаве низкоплавкой эвтектики фторидных солей (при 500°C) с выделением на катоде высокочистого кремния, а на аноде элементарного фтора, используемого в рецикле для фторирования исходного кварцевого песка.

Аппаратурно-технологическая схема производственного модуля изображена на рис. 2. Промышленными аналогами предложенного способа производства ППК являются способы электролитического производства металлического циркония и алюминия.

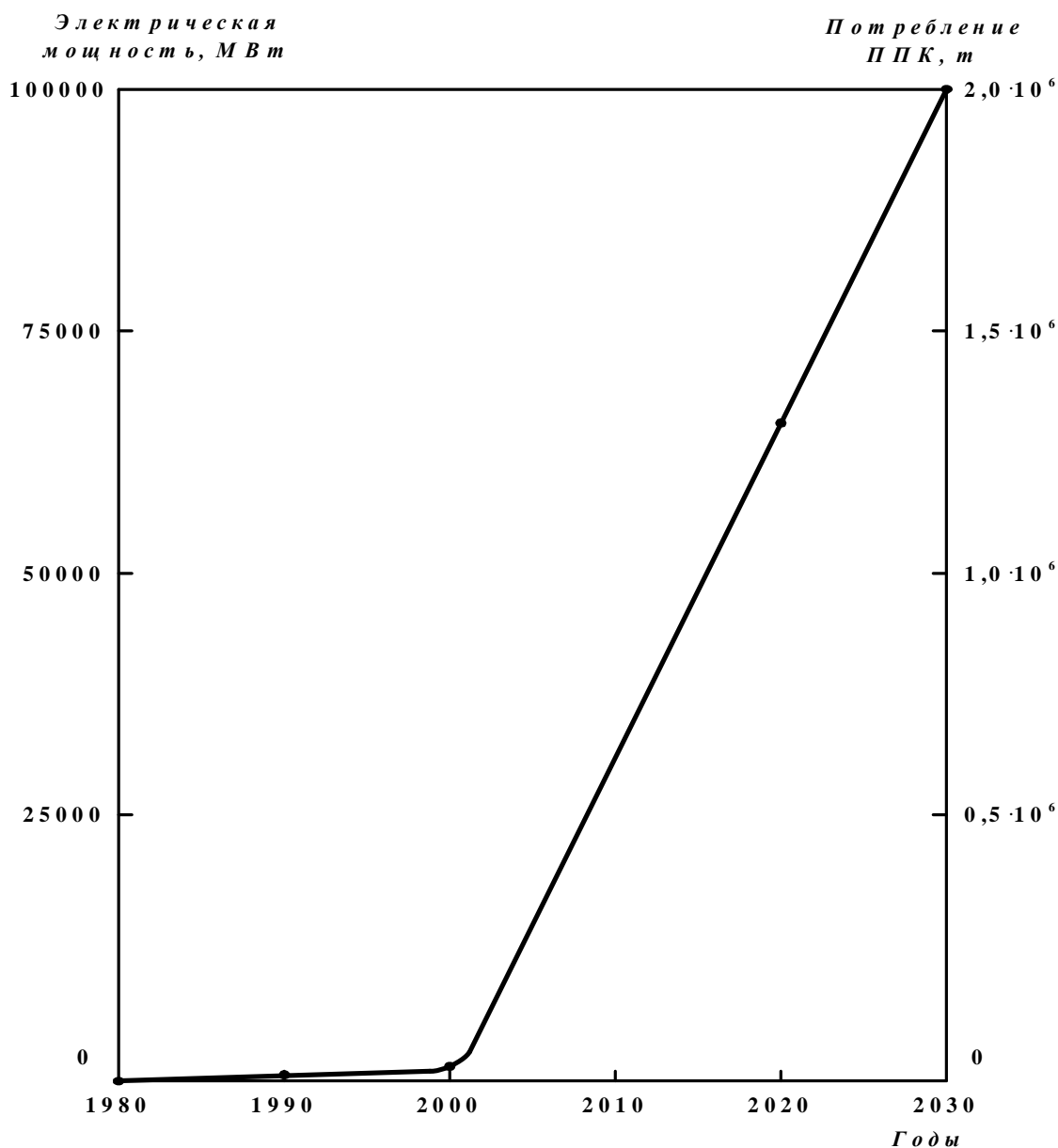


Рис. 1. Темпы роста электрических мощностей солнечной энергетики и потребности ППК

Себестоимость производства ППК предложенным способом не выше, чем при получении алюминия, т. к. в качестве исходного сырья используют дешевый кварцевый песок, а удельный расход электрической энергии для электролитического получения ППК незначительно превышает удельный расход электроэнергии при производстве алюминия. Следовательно, ППК, полученный по предложенному способу может быть реализован в производстве фотоэлектрических преобразователей в солнечной энергетике по цене значительно меньшей 10 \$/кг и обеспечить конкурентоспособность солнечной энергетике [10].

Выводы. Ядерная и солнечная энерготехнологии должны развиваться параллельно. В XXI веке ядерная энерготехнология несомненно займет достойное место в базовой энергетике, а солнечная – в децентрализованной независимой энергетике.

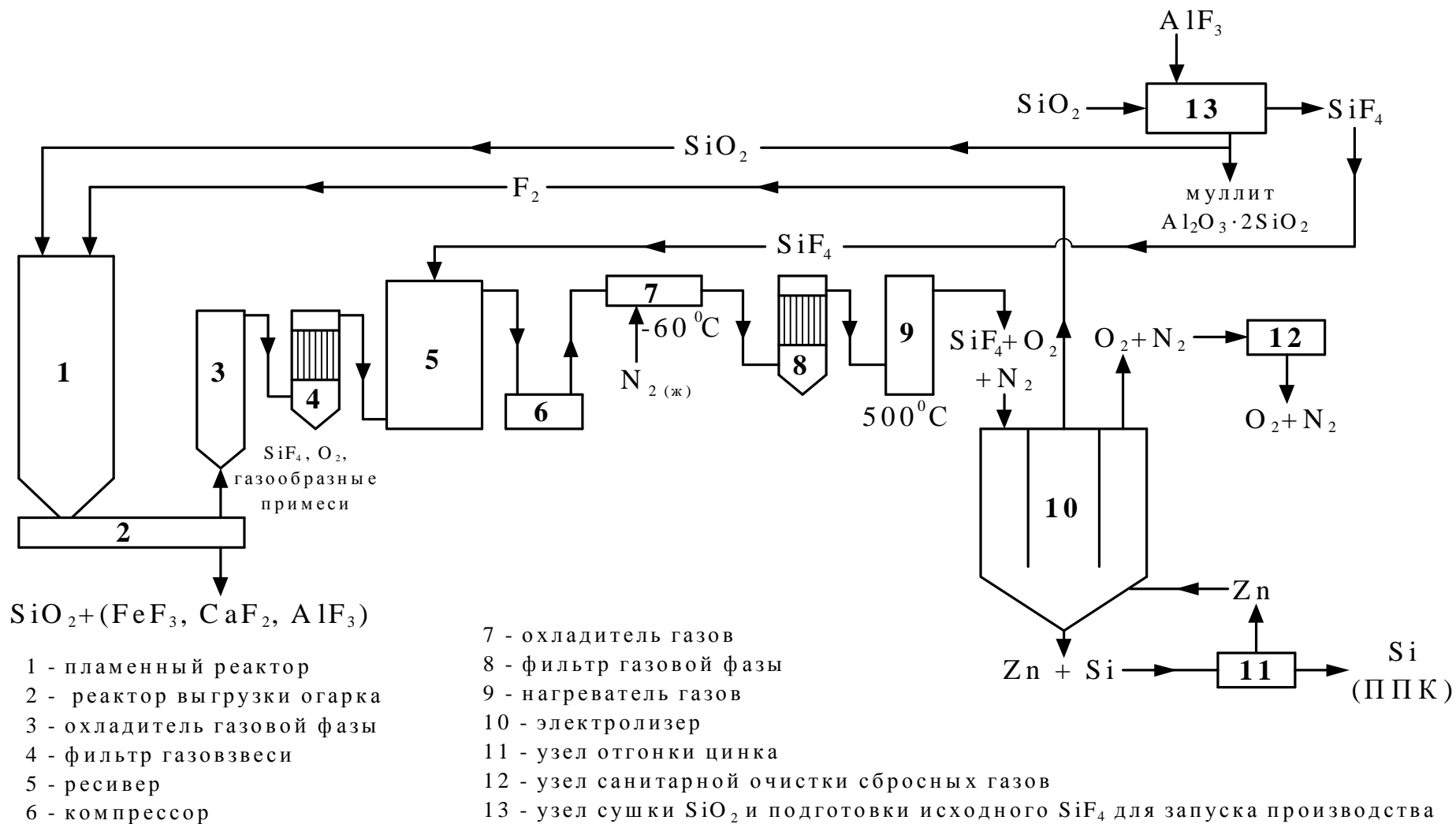


Рис.2. Аппаратурно-технологическая схема производственного модуля

ЛИТЕРАТУРА

1. Карелин А. И., Домашев Е. Д., Абубекеров Р. А. Атомная техника на пороге XXI века // Промтеплотехника. – 1998. – Т. 20. – № 5. – С. 37-46.
2. Карелин А. И. Проблемы и перспективы развития ядерной энергетики. – СПб. – Радиохимия. – 1996. – Т. 38. – Вып. 4. – С.289-299.
3. Домашев Е. Д. О возможности развития атомной энергетики в Украины в XXI веке // Новини енергетики. – 2002. – № 6. – с. 24-31.
4. Абубекеров Р. А., Банников Ю. А., Домашев Е. Д., Счастливый Г. Г. Есть ли перспективы развития атомной энергетики в Украине // Вестник УБНТЗ. – 1998. – № 5. – С.23-27.
5. Рачков В.И. О стратегии развития атомной энергетики в России в XXI веке. // Весник Укр. ядерного об-ва. – 2000. – № 3-4. с.8-9.
6. Гагаринский А.Ю. Ядерная энергетика в ближайшем будущем и дальней перспективе. // Теплоэнергетика. – 2000. – № 7. – с. 72-75.
7. Карелин А.И., Карелин В.А., Домашев Е.Д. О целесообразности сжигания плутония в реакторах на тепловых нейтронах и возможности фторидной переработки отработавшего топлива. // Промтеплотехника. – 1998. – т. 20. – с. 58-62.
8. Абубекеров Р.А., Домашев Е.Д., Карелин А.И. О целесообразности создания замкнутого ядерного топливного цикла в Украине. // Промтеплотехника. – 1999. – т. 21. – № 1. с. 32-36.
9. Карелин А.И., Карелин В.А., Домашев Е.Д., Домашев В.Е., Ковалев С.В., Попадейкин М.В. Обоснование процесса фторирования отработавшего уран-плутоний нитридного топлива реактора БРЕСТ элементным фтором. // Промтеплотехника. – 2002. – т.24. – № 2-3. – с.116-121.
10. Карелин А.И., Карелин В.А., Домашев Е.Д., Домашев В.Е., Юферова А.П., Абубекеров Р.А. Производство поликристаллического полупроводникового кремния. // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2002. – № 1. – с. 35-38.
11. Карелин А. И., Карелин В. А., Трубин Д. А., Чернышов А. Г. Патент на изобретение RU № 2156220 С1 26.05.99. – Бюл. изобретений. – № 26, 20.09.2000.