



УДК 624.122:621.311.25

Ю.В. Богданов, В.С. Тимченко

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ СРЕДНЕЙ И МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Yu.V. Bogdanov, V.S. Timchenko

### TECHNICAL AND ECONOMICAL PROBLEMS AND PROSPECTS FOR THE CREATION OF UNDERGROUND NUCLEAR POWER PLANTS OF MEDIUM AND SMALL POWER

Рассматриваются технические, политические, экономические вопросы повышения безопасности атомных станций за счет подземной компоновки реакторной установки или всей станции. Анализируется опыт строительства и эксплуатации подземных атомных электростанций (ПАЭС) в различных странах мира. Приводятся характеристики построенных, проектируемых ПАЭС и их области применения. Рассматриваются возможные варианты реакторных установок для ПАЭС. Обосновывается вывод о перспективности инновационного направления строительства ПАЭС малой и средней мощности с учетом их надежности, безопасности, экономической эффективности для отдельных промышленных регионов России.

БЕЗОПАСНОСТЬ АЭС. ПОДЗЕМНАЯ АЭС. ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ. СТРОИТЕЛЬСТВО. ЭКСПЛУАТАЦИЯ АЭС. КОРАБЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГАЗОВЫЙ РЕАКТОР.

Considers technical, political, and economic issues improve the safety of nuclear power plants due to the layout of underground reactor or the entire station. The analysis of the experience of the construction and operation of underground nuclear power plants (UNPP) in the various countries of the world. Characteristics of newly built, designed UNPP and their application. Possible variants of reactor plants for UNPP. The conclusion about the prospect of building innovative direction UNPP small and medium power for some industrial regions of Russia with regard to their reliability, safety, cost-effectiveness.

SAFETY OF NPP. UNDERGROUND NPP. ENERGY SUPPLY. CONSTRUCTION. EXPLOITATION OF NPP. SHIP BUILDING TECHNOLOGY.

Обеспечение безопасности атомных станций (АЭС) — важнейшая задача атомной энергетики во всем мире. Эта проблема возникла после серьезных аварий на АЭС Три-Майл-Айленд в США в 1979 году и на Чернобыльской АЭС в 1986-м, а в свете последних событий, связанных с аварией на АЭС Фукусима в Японии в 2011 году, она стала еще более актуальной. После непредсказуемого падения метеорита в Челябинской области в феврале 2013 года эта проблема проявилась еще с одной стороны (относительно недалеко от места падения метеорита расположен комбинат «Маяк» по переработке отработавшего ядерного топлива и строящаяся Южно-Уральская АЭС).

Поэтому еще до фукусимской аварии в развитых странах мира, в том числе и России, разрабатывались концепции по проектированию АЭС нового поколения повышенной безопасности. В частности, современные атомные станции с корпусными реакторами типа ВВЭР-1200 (Тяньваньская АЭС в Китае, ЛАЭС-2, Балтийская АЭС, Белорусская АЭС) сооружаются по проекту «АЭС-2006» и, в отличие от предыдущих поколений АЭС, обеспечивают надежность и безопасность при любых экстремальных воздействиях, включая удар от падающего самолета и плавления активной зоны реактора.

Однако абсолютная безопасность АЭС не может быть гарантирована даже при создании

новых поколений реакторов повышенной безопасности, разработки которых ведутся в США (ABWR, APWR, SBWR), Японии (SHBWR), Франции (PIUS) и России (ВПБЭР).

Кардинальным решением проблемы безопасности в атомной энергетике считается строительство подземных АЭС (ПАЭС). Впервые идею подземной атомной станции предложил в 1979 году В.М. Юровицкий, который направил свою заявку на изобретение [9]. Активным сторонником подземной ядерной энергетики до конца своей жизни был академик А.Д. Сахаров. Он в своем обращении к президенту АН СССР Г.И. Марчуку после чернобыльской катастрофы предложил развивать строительство ПАЭС, ссылаясь на разработки В.М. Юровицкого [9].

Первый промышленный подземный ядерный реактор был введен в эксплуатацию еще в 1958 году в г. Железногорске (бывший Красноярск-26) на глубине 250 м, но он предназначался не для энергетики, а для наработки оружейного плутония. И только с вводом второго блока в 1964 году эта первая и до сих пор единственная в нашей стране ПАЭС стала использоваться для обеспечения г. Железногорска с населением более 100 тыс. человек тепловой и электрической энергией, т. е. в режиме АТЭЦ.

В мире (кроме России) построено и эксплуатируется шесть подземных атомных станций: «Халден» (1960 г., Норвегия), «Гумбольдт» (1968 г., США), «Агеста» (1964 г., Швеция), «Люцерн» (1968 г. Швейцария), «Сена-Чуз» и «Тулуз-2» (1967 и 2005 гг., Франция). Национальные программы развития атомной энергетики США, Канады, Японии и других стран содержат проекты строительства ПАЭС.

Накопленный мировой опыт создания и эксплуатации ПАЭС в Швеции, США, Франции и других странах показывает, что подземная компоновка ядерной установки обеспечивает гораздо более высокую степень защиты окружающей среды и населения, чем у аналогичных наземных АЭС [3].

До 1996 года Финляндия отправляла облученное ядерное топливо в Россию. Теперь финские радиоактивные отходы помещаются в своих приповерхностных хранилищах [7]. Глубина таких хранилищ на АЭС «Ловииза» составляет 110 метров. Тоннели имеют высоту до 20 метров, пробиты в гранитной скале и протянулись на

сотни метров на такой глубине. От основных тоннелей вбок уходят штолни, где сейчас хранят мало- и среднерадиоактивные отходы; по мере заполнения эти штолни заливаются бетоном. Построены хранилища с таким расчетом, чтобы в них можно было провезти и разместить реакторы, парогенераторы, т. е. все крупногабаритное радиоактивное оборудование после завершения срока службы и демонтажа. Для этого от поверхности идут продолжительные, уходящие все глубже спиралевидные тоннели. Причем введение этих сооружений и будущее захоронение отработавших свое ядерных блоков уже учтены в цене выставляемого потребителю атомного киловатт-часа, который сейчас по статистике дешевле киловатт-часа, выработанного на газовой электростанции [7].

Общая идеология ПАЭС основывается на их известных преимуществах, к которым относятся:

самая эффективная защита от внешних воздействий (от падения самолета до боевого ракетного оружия);

обеспечение безопасности при любых проектных и запроектных авариях реактора, включая паровой взрыв и плавление активной зоны реактора;

рациональное решение проблемы сбора и хранения радиоактивных отходов;

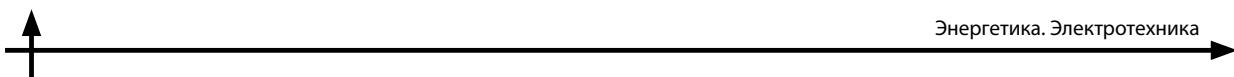
принципиальное упрощение и удешевление вывода из эксплуатации после выработки ее расчетного срока;

высокая степень пожарной безопасности по сравнению с наземным расположением за счет методов и средств регулирования состава воздуха в герметичных помещениях;

возможность размещения ПАЭС в непосредственной близости от города или промышленного объекта и повышение за счет этого эффективности использования тепловой и электрической энергии.

Основной недостаток подземного расположения атомных станций — повышенная на 25–40 % стоимость строительства (хотя для некоторых стран — Финляндии, Швеции, Норвегии — она намного ниже благодаря хорошо отработанной технологии подземного строительства) [3].

Однако с учетом гораздо меньших затрат по выводу из эксплуатации ПАЭС по сравнению



с наземной аналогичной станцией их общие стоимости строительства становятся сопоставимыми.

В мире разработано более десятка проектов подземных атомных станций. Но, несмотря на различие их компоновки, конструктивных решений, мощности и типов реакторов, все их можно разделить на три типа в зависимости от расположения относительно земли (рис. 1):

в подземной выработке шахтного или туннельного (штольневого) типа (обычно в скальном массиве);

в открытом котловане с последующей обратной засыпкой (в нескальных грунтах);

комбинированное размещение АС с подземной компоновкой реакторного отделения и его вспомогательных систем и наземным расположением турбинного отделения и электротехнического оборудования.

Основная идея сооружения ПАЭС заключается в создании безопасных атомных станций с надежной защитой населения и окружающей среды от возможного радиоактивного заражения, так как окружающий массив при максимальной проектной аварии препятствует или значительно уменьшает уровень радиоактивного загрязнения атмосферы (табл. 1). Сооружение ПАЭС возможно практически в любых инженерно-геологических условиях независимо от крепости породы и свойств грунта.

При выборе места строительства ПАЭС необходимо учитывать рельеф местности и рационально использовать разработанные ранее подземные выработки от добывчи полезных ископаемых. При этом следует иметь в виду, что единичная мощность блока ПАЭС имеет ограничение, связанное с допустимым по условиям обеспечения прочности оболочки на горное давление максимальным пролетом реакторного отделения.

В связи с этим для ПАЭС наиболее подходят варианты реакторов малой и средней мощности. По классификации МАГАТЭ к реакторам средней мощности (PCM) относятся те, которые имеют эквивалентную электрическую мощность менее 700 МВт, а к реакторам малой мощности (PMM) — менее 300 МВт.

Учитывая существующий дефицит в энергоснабжении отдельных городов и промышленных центров в различных регионах России, одним из наиболее рациональных решений этой

проблемы может считаться строительство ПАЭС с реакторами средней и малой мощности. Преимущество использования PCM и PMM связано с упрощением компоновки реакторной установки и возможностью разработки унифицированного проекта с реакторами полного заводского изготовления.

В нашей стране уже выполнены разработки нескольких вариантов АЭС, АТЭЦ и АСТ с реакторами средней и малой мощности [6]. Среди них наибольшим преимуществом обладают варианты атомных станций, использующих судовые реакторные установки типа КЛТ-40 и КН-3 единичной мощностью соответственно 35 МВт и 110 МВт. Это реакторы полностью заводского изготовления с давно освоенной реакторной технологией; их надежность подтверждена многолетней успешной эксплуатацией атомных ледоколов. Одно из перспективных направлений их использования — серийное строительство плавучих атомных энергетических блоков, которое реализуется со спуском на воду первого из них, носящего имя «Академик Ломоносов» [6]. Другим перспективным направлением считается применение таких судовых реакторных установок в подземных атомных станциях.

Так, еще в 1997 году в Белгородской области, где имеются большие подземные выработки, по заданию правительства были разработаны эскизные проекты создания подземной атомной станции теплоснабжения мощностью 300 МВт с четырьмя автономными энергомодулями по 75 МВт каждый [11]. При этом рассматривались два варианта подземного расположения ПАЭС: шахтный и туннельный (рис. 2). В шахтном варианте центральная камера имеет диаметр 30 м и высоту 20 м. Она соединена с четырьмя автономными туннелями реакторных модулей сечением 12×18 м и длиной около 45 м каждый. Эти реакторные отсеки через центральную камеру связаны с отсеками по переработке и временному хранению РАО и ОЯТ транспортно-технологическим туннелем, который соединен с земной поверхностью вертикальным шахтным стволом диаметром 6 м.

ТунNELи реакторных модулей отделяются от центральной камеры прочноплотными затворами, а все транспортно-технологические операции по перемещению оборудования, расходных материалов и топлива осуществляются через

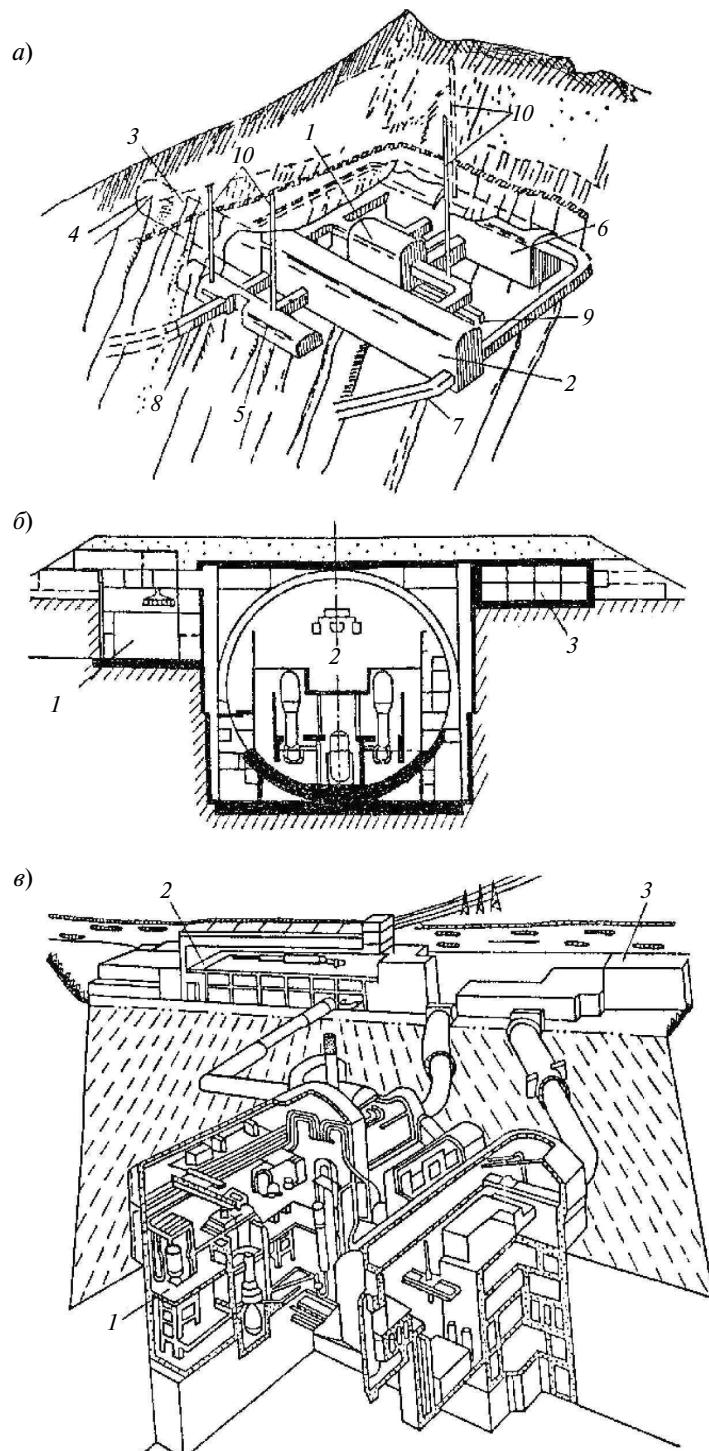


Рис. 1. Варианты размещения атомных станций:

a — подземная АС (1 — реакторное помещение; 2 — помещение машинного зала; 3 — центр управления; 4 — помещение электротехнического оборудования; 5 — трансформаторное помещение; 6 — помещение вспомогательного оборудования; 7 — основной входной тоннель; 8 — запасной входной тоннель; 9 — расширительный объем; 10 — вентиляционные шахты);

б — котлованная АС (1 — помещение вспомогательных систем реактора; 2 — реакторное помещение; 3 — помещение электротехнического оборудования);

в — комбинированная АС (АС «Сена-Чуз») (1 — реакторное помещение; 2 — помещение электротехнического оборудования; 3 — помещение вспомогательных систем)



Таблица 1  
События, важные для безопасности АЭС

Событие	Подземная АЭС	Плавучая АЭС	Наземная АЭС
Падение тяжелого летательного аппарата	—	+	+
Внешнее затопление	+	+	+
Штормовые волны (циунаи)	—	+	+
Экстремальная скорость ветра (торнадо)	—	+	+
Пожар на станции	+	+	+
Пожар на территории станции	—	+	+
Внутренне затопление	+	+	+
Сейсмическая активность	—	+	+
Взрывы промышленных и военных объектов за пределами станции	—	+	+
Метеориты	—	+	+
Молнии	—	+	+
Аварии на транспорте	—	+	+
Усадка грунта (выравнивание внутреннего напряжения в нем)	+	—	+
Аварии на газопроводах вне станции	—	+	+
Выделение токсичных газов	+	+	+
Воздействие на ЯЭУ осколков при аварии турбины	—	+	+
Оползень	—	+	+
Навал льда	—	+	—
Навигационная авария	—	+	—
Применение легкого реактивного оружия	—	+	+
Применение фугасных или бетонобойных бомб	—	+	+
Диверсии, терроризм	—	+	+

центральную камеру и ствол шахты. Трубопроводы и кабели всех назначений имеют специальные герметизированные проходки в затворах; проход персонала обеспечивается через специальные тамбур-шлюзы, а для выхода на поверхность используются два лифта.

Для туннельного варианта, более предпочтительного для условий Белгородской области, вместо шахтного ствола в склоне крутой балки проходит горизонтальная штолня длиной около 100 м [11]. К ней присоединяются четыре параллельных автономных энергетических модуля с реакторной установкой и турбогенераторным блоком. Въезды в них используются для строительства, монтажа модулей

и их транспортировки для ремонта или вывода из эксплуатации. С противоположного торца модули через герметичные транспортные проемы соединяются с транспортно-технологическим туннелем сечением 6×8 м, через который производится перемещение оборудования, расходных материалов и персонала внутри ПАЭС между туннелями, хранилищами и другими технологическими помещениями. Транспортный туннель обеспечивает через герметизированный въезд связь подземной и надземной частей станции. Ввод и вывод трубопроводов и кабелей в туннели осуществляется также через специальные герметизированные проходки [11].

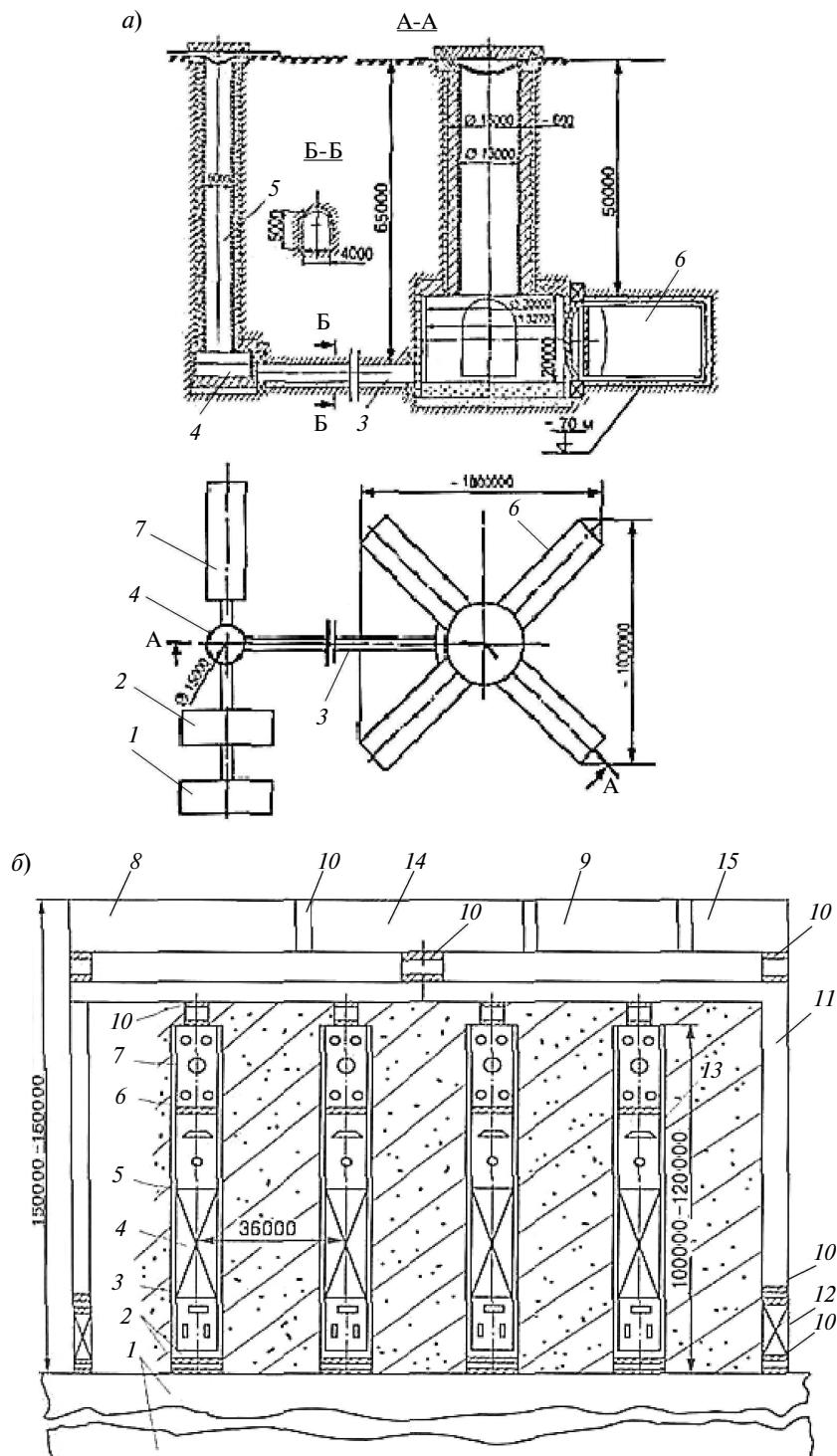
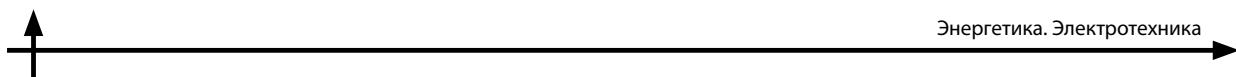


Рис. 2. Варианты подземного расположения ПАЭС:

*a* — шахтный вариант (1 — помещение для хранения переработанных жидких радиоактивных отходов (ЖРО); 2 — помещение для переработки ЖРО; 3 — транспортно-технологический тоннель; 4 — технологическая камера; 5 — вертикальная шахта; 6 — реакторный отсек; 7 — временное мокрое хранилище ОЯТ);

6 — туннельный вариант (1 — транспортно-монтажная площадка; 2 — прочноплотный затвор; 3 — блок электротехнический; 4 — блок бойлеров; 5 — турбогенераторный блок; 6 — реакторный блок; 7 — мокрое хранилище РАО и вспомогательные помещения; 8, 14 — технологический участок; 9 — камера переработки РАО; 10 — шлюзовая камера; 11 — транспортный тоннель; 12 — санпропускник; 13 — контейнер АЭУ; 15 — временное хранилище РАО)



Для каждого из этих вариантов предусматривалось использование судовых реакторов типа КЛТ-40 электрической мощностью 75 МВт и тепловой мощностью 150 Гкал/час. Габарит и масса этих реакторов позволяют без проблем транспортировать и осуществлять монтаж их в подземных выработках сечением 12×18 м и более, что для отечественной практики подземного строительства является освоенной технологией.

Технология проходки шахтных стволов и горизонтальных штолен разработана на основе опыта сооружения подземных объектов энергетического и специального назначения (гидротехнические и транспортные туннели, подземные машинные залы ГЭС, объекты горнодобывающей промышленности, метростроение, объекты Минобороны).

Для шахтного варианта строительство начинается с сооружения проходческого железобетонного «воротника», разработки грунта внутри него ведутся экскаватором и транспортировкой в отвал. Вертикальный ствол проходит до отметки 70 м, на которой бетонируют

силовое железобетонное днище, затем устраивают центральную камеру диаметром 30 м, из нее проходят горизонтальные туннели для реакторных модулей. При этом для крепления стен шахт и туннелей используется проходческая крепь из царг и тюбингов стандартных профилей и типоразмеров. Однако несущие элементы подземных выработок железобетонной обделки ПАЭС проектируются и сооружаются на все возможные силовые воздействия реакторного отделения при нормальных и аварийных условиях эксплуатации. А размеры основных помещений подземной части станции рассчитываются на транспортировку и монтаж реакторной установки из крупноблочных заводских модулей.

Выбор окончательного варианта ПАЭС должен учитывать не только общие объемы трудовых и материальных затрат, но и удобство эксплуатации, в том числе затраты на вывод из эксплуатации. Сопоставление основных показателей этих двух вариантов для ПАЭС в Белгородской области дано в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

## Основные показатели при сооружении шахтного варианта станции

Помещение	Кол-во	Объем вынимаемой породы, м <sup>3</sup>	Объем укладываемого бетона, м <sup>3</sup>	Масса металла облицовки ( $\delta = 12$ мм), т
Тоннель реакторного модуля	4	50000	7000	1000
Ствол шахты	1	14500	3900	170
Центральная камера	1	24000	6300	240
Транспортно-технологический тоннель	1	2250	310	40
Участок переработки и хранения РАО и ОЯТ	3	34000	5200	690
Ствол малой шахты	1	6750	940	130
Итого:		131500	23650	2270

Таблица 3

## Основные показатели при сооружении тоннельного варианта станции

Помещение	Кол-во	Объем вынимаемой породы, м <sup>3</sup>	Объем укладываемого бетона, м <sup>3</sup>	Масса металла облицовки ( $\delta = 12$ мм), т
Тоннель реакторного модуля	4	130000	18200	2600
Транспортно-технологический тоннель	1	15000	2000	260
Участок переработки и хранения РАО и ОЯТ	1	35000	5200	690
Итого:		180000	25400	3550



Другой проект ПАЭС был предложен в Свердловской области [5] для энергоснабжения промышленного района в радиусе 40 км от г. Кушва, в который входят Уралвагонзавод (г. Нижний Тагил), Нижнетагильский металлургический комбинат, ВСМПО (г. Верхняя Салда), Баранчинский механический завод, комбинат «Электрохимприбор». Эти промышленные предприятия испытывают большой дефицит электрической и тепловой энергии, и местные региональные власти предложили решить эту проблему за счет строительства ПАЭС. Для ее размещения под землей предложено использовать отработанную железорудную шахту «Валуевская» на глубине 50 м, которая располагается в крепких гранитных породах. По оценкам специалистов они имеют высокую сейсмостойкость и способны обеспечить надежную и безопасную работу ПАЭС в сотни лет. На ПАЭС будут установлены 6 энергоблоков общей мощностью 210 МВт также с использованием корабельных реакторов типа КЛТ-40С. При этом себестоимость энергии ПАЭС будет ниже, чем у наземной АЭС за счет сокращения срока строительства и существенной экономии на подземную проходку. Общая стоимость строительства составит около 540 млн долларов [5].

Для промышленных производств, использующих высокопотенциальное тепло, экономически оправданно расположение ПАЭС в непосредственной близости от потребителя, что позволит снизить стоимость теплопроводов и повысить эффективность подземной атомной станции. Это прежде всего касается химических, нефтехимических производств и предприятий цветной и черной металлургии. В большинстве из них требуются температуры порядка 600–800 °C и выше, которые могут быть получены и переданы теплоносителем от ядерного реактора. В этом отношении наиболее перспективен вариант применения высокотемпературных газовых реакторов (ВТГР), которые позволяют получать на выходе теплоноситель с температурой 700–1000 °C [4]. В нашей стране уже разработано несколько типов ВТГР различной мощности и конструкции. Из них для использования в ПАЭС подходят ВГР-50 и ВГМ-200 (рис. 3) с прочноплотными сварными корпусами заводского изготовления и следующими характеристиками:

#### *Реактор ВГР-50*

Максимальный наружный диаметр

корпуса реактора, м .....	4,58
Высота корпуса реактора, м.....	10,8
Тепловая мощность реактора, МВт .....	136
Теплоноситель .....	гелий
Давление в реакторе, МПа.....	4
Температура теплоносителя, °C:	

на входе в реактор .....	296
на выходе из реактора .....	810

Расход теплоносителя через реактор, кг/с .....	51
------------------------------------------------	----

Размеры активной зоны, м	
диаметр .....	2,8
высота .....	4,5

Удельная энергонапряженность активной зоны, кВт/л .....	6
---------------------------------------------------------	---

Тип твэла и пэла .....	шаровой
------------------------	---------

Наружный диаметр твэла и пэла, мм .....	60
-----------------------------------------	----

Кампания одной загрузки, эф. сут .....	450
----------------------------------------	-----

Среднее выгорание топлива, МВт сут/кг .....	100
---------------------------------------------	-----

#### *Реактор ВГМ-200*

Тепловая мощность реактора, МВт .....	200
---------------------------------------	-----

Электрическая мощность, МВт.....	80
----------------------------------	----

Теплоноситель.....	гелий
--------------------	-------

Температура теплоносителя, °C .....	750 (950)
-------------------------------------	-----------

Давление геля в реакторе, МПа.....	7
------------------------------------	---

Размеры активной зоны D/H, м .....	3/9,4
------------------------------------	-------

Топливные керны .....	двуокись урана
-----------------------	----------------

Форма твэла, наружный диаметр, мм .....	шар, 60
-----------------------------------------	---------

Количество топливных элементов	
--------------------------------	--

в активной зоне.....	3·10 <sup>5</sup>
----------------------	-------------------

Обогащение урана, %.....	8
--------------------------	---

Теплонапряженность, МВт т/м <sup>3</sup> .....	3,1
------------------------------------------------	-----

Расчетное выгорание, МВт сут/кг .....	80
---------------------------------------	----

Кампания, сут .....	950
---------------------	-----

Кратность циркуляции твэлов через а.з. ....	10–15
---------------------------------------------	-------

Технологическое производство ....	электроэнергия+водород
-----------------------------------	------------------------

Схема РУ .....	двухконтурная
----------------	---------------

Каждый из них обладает уникальными характеристиками по обеспечению безопасности и существенно повышенными энергетическими показателями по сравнению с реакторами других типов.

Это позволяет считать использование ВТГР в подземных атомных станциях одним из перспективных инновационных направлений в развитии атомной энергетики в России.

Для технико-экономического обоснования строительства ПАЭС необходимо учитывать многие факторы: существующий и прогнозируемый дефицит энергии, альтернативные источники энергии, геологическую характеристи-

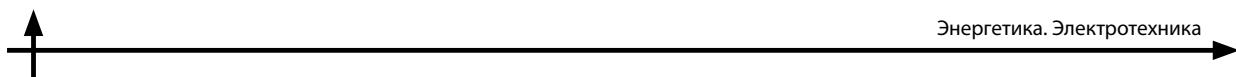


Рис. 3. Реактор ВГМ-200:

1 — реактор; 2 — силовой корпус; 3 — промежуточный теплообменник; 4 — парогенератор; 5 — газодувка; 6 — система охлаждения; 7 — система циркуляции твэлов; 8 — система поглощающих шариков; 9 — система очистки гелия; 10 — сбросной клапан; 11 — система паровой турбины (преобразования энергии)

стистку подземных пород, отсутствие/наличие заброшенных подземных выработок, транспортные связи, источники финансирования, отношение местных властей и населения к строительству ПАЭС, поддержку Росатома и Правительства РФ, готовность и заинтересованность научных, проектных, строительных и монтажных организаций в строительстве ПАЭС.

По предварительным расчетам увеличение стоимости ПАЭС глубокого заложения по сравнению с наземным вариантом составляет 20–25 % [3], но при размещении ее уже в существующей подземной выработке с использованием судовых реакторных установок капиталовложения снижаются на 30–40 % [10]. Поэтому, по оценкам специалистов, себестоимость энергии для Кушвинской ПАЭС — около 3 центов за кВт·ч и 11,4–12,2 долларов за Гкал тепловой энергии [10]. При этом следует отметить, что

технико-экономическое сопоставление альтернативных источников энергии для нашей страны (при различных ставках финансирования) подтверждает преимущество ядерной энергетики [8], а для ПАЭС оно становится еще более значительным (табл. 4).

Таблица 4  
Диапазон стоимости электроэнергии для разных  
энерготехнологий

Энерготехнология	Стоймость электроэнергии, долл./кВт·ч, для двух ставок дисконтирования	
	5 %	10 %
Уголь	0,023–0,048	0,028–0,058
Газ	0,039–0,056	0,043–0,059
Ядерная энергия	0,024–0,036	0,031–0,054

На основании анализа приведенных данных можно сделать следующие выводы:

В настоящее время ПАЭС являются самыми безопасными по сравнению с другими типами АЭС, обладая исключительными преимуществами в эксплуатации.

Для надежного энергоснабжения отдельных промышленных центров и городов, удаленных от централизованных источников энергии, рациональным решением считается использование ПАЭС малой и средней мощности.

Применение в ПАЭС судовых реакторных установок типа КЛТ-40 и КН-3 дает возмож-

ность их установки в подземных выработках относительно небольших размеров.

ВТГР корпусного типа в ПАЭС позволяют принципиально повысить эффективность энергоемких производств за счет использования высоких (свыше 800 °C) температур газового теплоносителя.

Себестоимость энергии ПАЭС малой и средней мощности сопоставима с аналогичными показателями для станций на органическом топливе, а с учетом затрат на вывод из эксплуатации она меньше, чем для наземной АЭС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Котенко, Е.А.** Создание подземных атомных станций [Текст] / Е.А. Котенко.— М.: ЦНИИатоминформ, 1996.
- 2. Мостков, В.М.** Проектирование и строительство подземных атомных электростанций [Текст]: Обзорная информация / В.М. Мостков, А.П. Кириллов, Ю.Б. Nikolaev, В.Г. Богопольский.— М.: Информэнерго, 1985.— 68с.
- 3. Муратов, О.Э.** Подземные АЭС: Эффективность и безопасность [Текст] / О.Э. Муратов // Вопросы атомной науки и техники.— 2002.— №6.
- 4. Гребенник, В.Н.** Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы— инновационное направление развития атомной энергетики [Текст] / В.Н. Гребенник, Н.Е. Кухаркин, Пономарев- Н.Н. Степной.— М.: Энергоатомиздат, 2008.— Серия: Физико-технические проблемы ядерной энергетики.
- 5. Петербургская компания предлагает закопать АЭС под землю** [Электронный ресурс] // Деловой Петербург.— электрон. газета. Режим доступа: [http://www.dp.ru/a/2011/03/29/Peterburgskaja\\_kompanija\\_rg/](http://www.dp.ru/a/2011/03/29/Peterburgskaja_kompanija_rg/), свободный.— Загл. с экрана.
- 6. Петрунин, В.В.** Реакторные установки разработки ОАО «ОКБМ Африкантов» для атомных станций малой и средней мощности [Текст] / В.В. Петрунин, В.В. Африкантов // Атомные станции малой и средней мощности [Текст] / В.В. Петрунин, В.В. Африкантов.— М.: Издательство ОАО «ОКБМ Африкантов», 2002.— 128 с. (rus.)
- 7. Имамутдинов, И.** Ядерный ренессанс по-фински [Электронный ресурс] // Эксперт.— электрон. журн. Режим доступа: [http://expert.ru/expert/2008/39/yadernyy\\_renessans/](http://expert.ru/expert/2008/39/yadernyy_renessans/), свободный.— Загл. с экрана.
- 8. Артемова, Н.** Оценка конкурентоспособности проектов АЭС на мировом рынке [Текст] / Н. Артемова, В. Харитонов // Экономические стратегии.— 2010. № 7–8.— С. 122–133.
- 9. Юровицкий, В.М.** Атомное тепло России [Электронный ресурс] // Современный литературный журнал «Млечный путь» — электрон. журн., 2002.— Режим доступа: <http://www.milkywaycenter.com/works/yurovitsky1.html>, свободный.— Загл. с экрана.
- 10. Сальник, В.** Атомная энергия кораблей— для уральской АЭС [Электронный ресурс] // Правда.ру.— электрон. газета.— Режим доступа: <http://www.pravda.ru/economics/industry/powerengineering/12-06-2010/1035977-news-0/>, свободный.— Загл. с экрана.
- 11. Перспективы создания подземных атомных станций на территории России** [Электронный ресурс].— Режим доступа: <http://ecokma.com/index.php/pates/4-perspektiivy-sozdaniya-podzemnykh-atomnykh-stantsij-na-territorii-rossii>, свободный.— Загл. с экрана.

## REFERENCES

- 1. Kotenko, E.A.** Sozdanie podzemnykh atomnykh stantsii [Tekst].— M.: TsNIIatominform, 1996.— (rus.)
- 2. Mostkov V.M., Kirillov A.P., Nikolaev Yu.B., Bogopol'skii V.G.** Proektirovaniye i stroitel'stvo podzemnykh atomnykh elektrostantsii. Obzornaia informatsiia [Tekst].— M.: Informenergo, 1985.— 68 s. (rus.)
- 3. Muratov O.E.** Podzemnye AES: Effektivnost' i bezopasnost' [Tekst] // Voprosy atomnoi nauki i tekhniki.— 2002.— №6. (rus.)
- 4. Grebennik V.N., Kukharkin N.E., Ponomarev-Stepnovi N.N.** Vysokotemperaturnye gazookhlazhdemye reaktory— innovatsionnoe napravlenie razvitiia atomnoi energetiki [Tekst].— M.: Energoatomizdat, 2008.— 136 s.: il.— (Fiziko-tehnicheskie problemy iadernoj energetiki).— (rus.)
- 5. Peterburgskaia kompaniia predlagaet zakopat' AES pod zemliu** [Elektronnyi resurs] // Delovoi Peterburg.— elektron. gazeta. Rezhim dostupa: [http://www.dp.ru/a/2011/03/29/Peterburgskaja\\_kompanija\\_rg/](http://www.dp.ru/a/2011/03/29/Peterburgskaja_kompanija_rg/)



dp.ru/a/2011/03/29/Peterburgskaja\_kompanija\_pr/, slobodnyi.— Zagl. s ekranu.— (rus.)

6. Petrunin V.V., Fadeev Iu.P., Gureeva L.V., Skorodumov S.E. Reaktornye ustanovki razrabotki OAO «OKBM Afrikantov» dlja atomnykh stantsii maloi i srednei moshchnosti [Tekst] // Atomnaia energiya.— 2011.— T. 111, №5.— S. 285–289.— (rus.)

7. Imamutdinov, I. Iadernyi renessans po-finski [Elektronnyi resurs] // Ekspert.— elektron. zhurn. Rezhim dostupa: [http://expert.ru/expert/2008/39/yadernuy\\_renessans/](http://expert.ru/expert/2008/39/yadernuy_renessans/), slobodnyi.— Zagl. s ekranu.— (rus.)

8. Artemova N., Kharitonov V. Otseňka konkurentospособности proektov AES na mirovom rynke [Tekst] // Ekonomicheskie strategii.— 2010.— № 7–8.— S. 122–133.— (rus.)

9. Iurovitskii V.M. Atomnoe teplo Rossii [Elektronnyi resurs] // Sovremennyi literaturnyi zhurnal «Mlechnyi put'». — elektron. zhurn., 2002. Rezhim dostupa: <http://www.milkywaycenter.com/works/yurovitsky1.html>. slobodnyi.— Zagl. s ekranu.— (rus.)

10. Sal'nik, V. Atomnaia energiya korablei— dlja ural'skoi AES [Elektronnyi resurs] // Pravda.ru.— elektron. gazeta. Rezhim dostupa: <http://www.pravda.ru/economics/industry/powerengineering/12-06-2010/1035977-news-0/>, slobodnyi.— Zagl. s ekranu.— (rus.)

11. Perspektivy sozdaniia podzemnykh atomnykh stantsii na territorii Rossii [Elektronnyi resurs].— Rezhim dostupa: <http://ecokma.com/index.php/pates/4-perspektiivy-sozdaniya-podzemnykh-atomnykh-stantsij-na-territoriu-rossii>, slobodnyi.— Zagl. s ekranu.— (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ /AUTHORS

**БОГДАНОВ Юрий Владимирович** — кандидат технических наук доцент кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: y.bogdanov@bk.ru  
**BOGDANOV Yury V.** — St.-Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politehnicheskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia; e-mail: y.bogdanov@bk.ru

**ТИМЧЕНКО Владимир Сергеевич** — магистр кафедры гражданского строительства и прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: thegreatestclub@gmail.com  
**TIMCHENKO Vladimir S.** — St.-Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politehnicheskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia; e-mail: thegreatestclub@gmail.com