



Пять лет ядерной энергетики

Н. А. Доллежалъ, А. К. Красин

27 июня 1954 г. произошло крупное событие в науке и технике: первая в мире атомная электростанция, построенная под Москвой (г. Обнинск), дала ток в электрическую сеть. Хотя мощность, полученная от единственной турбины, была невелика (5 тыс. *квт*), Первая атомная станция обладала всеми чертами полномасштабной крупной электростанции. Это позволяло при относительно небольших затратах на сооружение станции приобрести опыт эксплуатации и в случае успешной работы распространить его на более мощные электростанции подобного типа.

Для ядерной энергетики, начало которой было положено пуском Первой атомной электростанции СССР, характерен очень быстрый рост атомных энергетических мощностей (рис. 1). Этот интенсивный рост будет продолжаться, так как в стадии завершения строительства находится ряд мощных атомных электростанций. Успехи ядерной энергетики очевидны и велики.

Однако к моменту пуска Первой атомной электростанции и тем более в начале ее проектирования не только не было определенного мнения о технических путях развития ядерной энергетики, но нередко высказывались скептические мнения о возможности развития ее как отрасли хозяйства.

Пуск и пятилетняя эксплуатация атомной станции в корне изменили эти мнения. Во-первых, пуск станции имел большое (и это признавалось всеми) общественное значение, так как стало ясно, что атомная энергия может служить целям прогресса, а не военного использования. Во-вторых, пятилетняя работа станции имеет большое техническое значение, так как в результате эксплуатации ее утвердился один из вариантов энергетического реактора, в отношении жизнеспособ-

ности которого высказывались сомнения даже после пуска станций.

За прошедшие пять лет было предложено и частично опробовано много вариантов энергетических реакторов, различающихся по

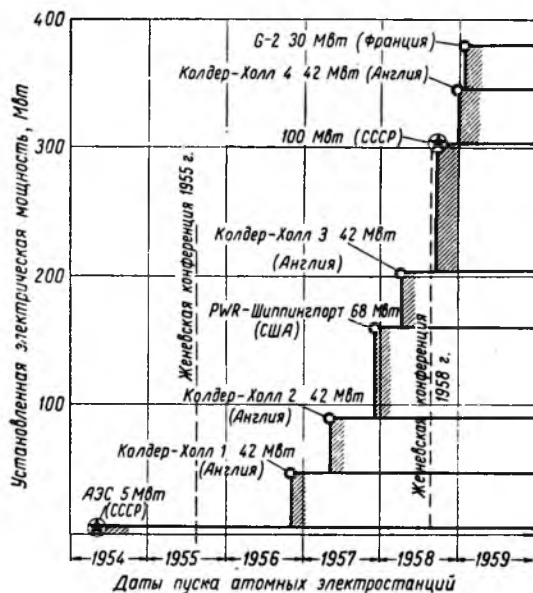


Рис. 1. Рост установленной мощности наиболее крупных атомных электростанций за пять лет.

конструкции и применяемым материалам. Это позволило в значительной мере разобратся в том, какие области научных и технических изысканий будут определяющими в дальнейшем развитии ядерной энергетики.

Работа станции позволяет не только оценить ее как один из вариантов решения проблемы энергетического использования атомной энергии, но и сделать надежные выводы из опыта ее эксплуатации.

В ряде опубликованных работ [1—6], посвященных описанию устройства и эксплуатации атомной электростанции, показано, что задачи, которые ставились при ее сооружении, были выполнены, а накопленный опыт является очень ценным для решения вопросов, связанных с проектированием мощных атомных электростанций с реакторами подобного типа.

Остановимся на некоторых наиболее важных выводах, которые можно сделать на основе пятилетнего опыта эксплуатации реактора.

На атомных электростанциях, так же как на обычных тепловых станциях, целесообразно повышение коэффициента полезного действия (к.п.д.). Стремление повысить параметры пара в реакторах с графитовым замедлителем неизбежно приводит к высоким температурам графита. Опыт длительной надежной эксплуатации реактора с температурой графита 700—750° С говорит о возможности достижения высоких температур теплоносителя в реакторах с графитовым замедлителем. Это нашло отражение в последующем проекте реактора для Уральской атомной станции [4] и последних проектах зарубежных реакторов с графитовым замедлителем, например английских реакторов «Зенит» [7], AGR [8] и американского реактора GCR-2 [9].

Непрерывный рост температуры теплоносителя на выходе из реактора является отличительной тенденцией современного реакторостроения. Рост к.п.д. станций, обусловленный стремлением повысить температуру и давление пара до значений, применяемых в современных паровых турбинах, приводит к снижению стоимости установленной мощности, т. е. к улучшению экономичности станций. Надежная работа графита при указанных выше температурах в Первой атомной электростанции позволила в проекте реактора Уральской станции предусмотреть получение пара, пригодного для питания турбин современного типа. Наличие ядерного перегрева пара в реакторе Уральской станции является особенностью этого реактора; величина полезного к.п.д. его значительно выше, чем у других известных типов реакторов.

Возможность кипения воды и перегрева пара в реакторе была подтверждена специальными опытами, проведенными на реакторе Первой атомной электростанции [4]. Были проведены также важные эксперименты по

ОТЗЫВЫ О ПЕРВОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ,

записанные в книге
посетителей:

Академик АН СССР **Г. М. Кржижановский**
(1956 г.):

«Практическое применение каждого нового вида энергии знаменует собой грандиозные этапы на пути поступательного движения человечества. Новым выдающимся событием в науке и технике является умение использовать колоссальную энергию, заключенную в ядре атома. В нашей стране, показывающей всем странам пример использования атомной энергии, построена первая в мире атомная электростанция мощностью в 5000 квт. Недалек тот день, когда войдут в строй атомные электростанции мощностью в пятьдесят и сто тысяч киловатт...».

Премьер-министр Индии **Джавахарлал Неру**
(1955 г.):

«Я рад, что посетил эту станцию, и очарован ею. Это дало возможность увидеть будущее, которое уже раскрывается...».

Президент республики Индонезии **Сукарно**
(1956 г.):

«Человеческий ум не знает пределов. Эволюция продолжается. Посещение этой станции укрепляет нашу веру в то, что человечество должно развивать свои знания, чтобы достигнуть более высокого уровня жизни...».

Послы США, Англии, Швеции (1955 г.):

«Ученые и инженеры Советского Союза первым применением атомной энергии в мирных целях сняли себе незабываемые заслуги перед всем человечеством. Эта атомная электростанция является огромным достижением советской науки и символом глубокой гуманности советского общества. Мы желаем советским ученым новых новаторских успехов на пути практического применения атомной энергии...».

Профессора Чжоу Бей-юань, Ху Чэн-мин, Цзян Нань-сян, Китайская Народная Республика (1955 г.):

«Мы очень рады, что имели возможность посетить атомную электростанцию. Построение первой в мире атомной электростанции является победой советской науки и победой социалистического строя.

Такое сочетание науки и техники, направленное на службу социалистическому строительству, является светлым примером для китайского народа. Мы надеемся, что при высокой международной помощи великого советского народа, опираясь на наш труд, мы сможем вложить свою долю участия в дело мирного использования атомной энергии для социалистического строительства в интересах мира».

Бывший член Британской проектной комиссии по использованию атомной энергии С. Г. Ризон (1955 г.):

«Я очень благодарен, что имел возможность увидеть большой прогресс, сделанный советскими учеными в мирном использовании атомной энергии. Как бывший член Британской проектной комиссии по атомной энергии знаю, какие многообразные проблемы должны быть решены для использования этого нового источника энергии, и на меня произвел впечатление способ, как эти проблемы были разрешены в СССР...».

Профессор Лейпцигского университета Густав Гертич, Германская Демократическая Республика (1956 г.):

«Я уже многое слышал об атомных электростанциях, многое читал, но то, что увидел здесь, превзошло мои ожидания...».

Настоятель Кентерберийского собора Хьюлет Джонсон (1956 г.):

«Более 40 лет прошло с тех пор, как я стал интересоваться наукой и техникой. Я мечтал о создании такой станции, как эта. Я был убежден, что социалистическая страна первая получит власть над атомной энергией, и я знал, что эту власть она использует в мирных целях. Я рад, что дожился до того времени, когда смог увидеть эту станцию собственными глазами, и приветствую всех, кто сделал ее возможной, и всех, кто работал на ней...».

изучению и отработке переходных режимов сооружаемой Уральской атомной станции. Получение перегретого пара в реакторе связано с необходимостью в процессе пуска реактора от холодного состояния изменять охлаждение каналов (предназначенных для перегрева пара), т. е. переходить с водяного охлаждения на паровое. Аналогичная проблема возникает и при остановке реактора, когда паровое охлаждение заменяется водяным. Опыты показали, что переходные режимы вполне осуществимы и не связаны с какими-либо трудностями эксплуатации таких систем. Это дает возможность использовать ряд различных схем атомных электростанций с перегревом пара в реакторе.

Таким образом, можно сделать следующий вывод из итогов эксплуатации атомной электростанции: конструкция реактора оказалась технически весьма гибкой; она позволила без сколько-нибудь значительных переделок осуществить крупномасштабный эксперимент по переводу реактора в прогрессивный режим кипения и перегрева теплоносителя в активной зоне.

Техническая гибкость реактора заложена в идее его конструкции—в использовании каналов с индивидуальной разводкой теплоносителя. Отсутствие корпуса под давлением дало возможность использовать реактор для широких экспериментов, проводить которые в реакторе корпусного типа либо очень сложно, либо просто невозможно. Постановку образцов различных конструкционных материалов, устройство петель для исследования тепловыделяющих элементов и режимов работы—все это довольно легко можно осуществить в реакторе этого типа. Следовательно, и в этом отношении выбор типа реактора Первой атомной электростанции оказался удачным.

Сейчас еще трудно определить, в какой области сформируется оптимум экономичности станции, зависящий от давления и температуры пара, однако перспектива их повышения непосредственно за счет тепла реакции деления очень заманчива.

Применение ядерного перегрева пара на атомных станциях позволяет снизить не только стоимость 1 квт·ч вырабатываемой электроэнергии, но (что не менее существенно) и стоимость установленной мощности.

Другим важным фактором, определяющим экономику ядерной энергетики, является

ся использование как загруженного, так и вновь образовавшегося горючего, а также использование нейтронов.

На стоимость вырабатываемой электроэнергии существенно влияет глубина выгорания ядерного горючего, т. е. отношение количества U^{235} , сгоревшего за время кампании, к его первоначальному количеству. Глубина выгорания горючего (особенно в реакторах на обогащенном уране) в известной мере характеризуется количеством тепла,

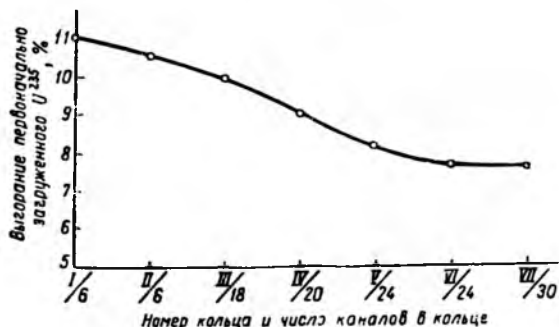


Рис. 3. Количество выгоревшего U^{235} по радиусу реактора (в % от первоначально загруженного) после первой кампании. Начальное содержание U^{235} равно 5%.

которое удастся отвести с единицы веса загруженного урана. Чем больше глубина выгорания, тем реже производится замена тепловыделяющих элементов в реакторе и тем меньшую долю стоимости единицы выработанной электроэнергии составляют затраты на изготовление рабочих каналов (с тепловыделяющими элементами), на химическую переработку горючего, извлеченного из реактора, и т. д.

Осуществление глубокого выгорания обусловливается стойкостью тепловыделяющего элемента, подвергающегося коррозионным, радиационным, температурным, нагрузочным и другим воздействиям. В реакторе Первой атомной электростанции имеются каналы, работающие бесценно с момента первой загрузки, т. е. в течение пяти лет. Первоначальный расчет реактора был произведен с целью получить выгорание горючего, соответствующее удельной выработке энергии ~ 10 тыс. *Мвт·дн/т*. Однако опыт работы показал, что тепловыделяющие элементы сохраняют свою работоспособность и при значительно больших удельных выработках энергии. Так, в некоторых элементах, подвергнутых специ-

альному исследованию, получена удельная выработка энергии до 30 тыс. *Мвт·дн/т*, что дает надежду добиться весьма эффективного использования горючего в реакторах подобного типа. Следовательно, из опыта эксплуатации станции можно сделать еще один вывод, состоящий в том, что при разработке проектов мощных атомных электростанций с аналогичными реакторами можно рассчитывать на их достаточно высокую экономичность, обуславливаемую высокой стойкостью тепловыделяющих элементов применяемого типа.

Глубина выгорания в значительной степени зависит от того, когда и каким образом производить в реакторе замену рабочих каналов. Известно, что в реакторе выгорание горючего в различных точках происходит неравномерно. Так, если активную зону реактора Первой атомной электростанции условно разбить на 7 кольцевых зон [3], изображенных на рис. 2, то после первой кампании глубина выгорания горючего в каналах, размещенных в различных кольцах, будет представлена кривой рис. 3. Из кривой видно, что в большей части каналов, расположенных на периферии, U^{235} выгорел значительно меньше, чем в центральных каналах, т. е. этот уран использован неполностью, а каналы не вырабатывали проектного количества тепла. Для достижения равномерного и повышенного выгорания горючего на Первой атомной электростанции был разработан и успешно применен метод частичной перегрузки каналов [6], заключающийся в перестановке периферийных каналов в центральную часть и загрузке периферийной части свежими каналами. При этом методе оказывается возможным добиться повышенных выгораний горючего и тем самым увеличить экономичность станции. Такое использование горючего уже предусматривается в некоторых проектах зарубежных атомных электростанций [13] и, безусловно, найдет широкое применение в будущем.

Чтобы глубокое выгорание U^{235} способом частичных перегрузок было экономически выгодным, необходимо создать такую конструкцию реактора, которая позволяла бы производить перегрузку без длительных простоев. В реакторе Первой атомной электростанции этому способствует обособленность каждого рабочего канала, позволяющая легко извлекать и заменять каналы независимо один от другого. В принципе, такая операция

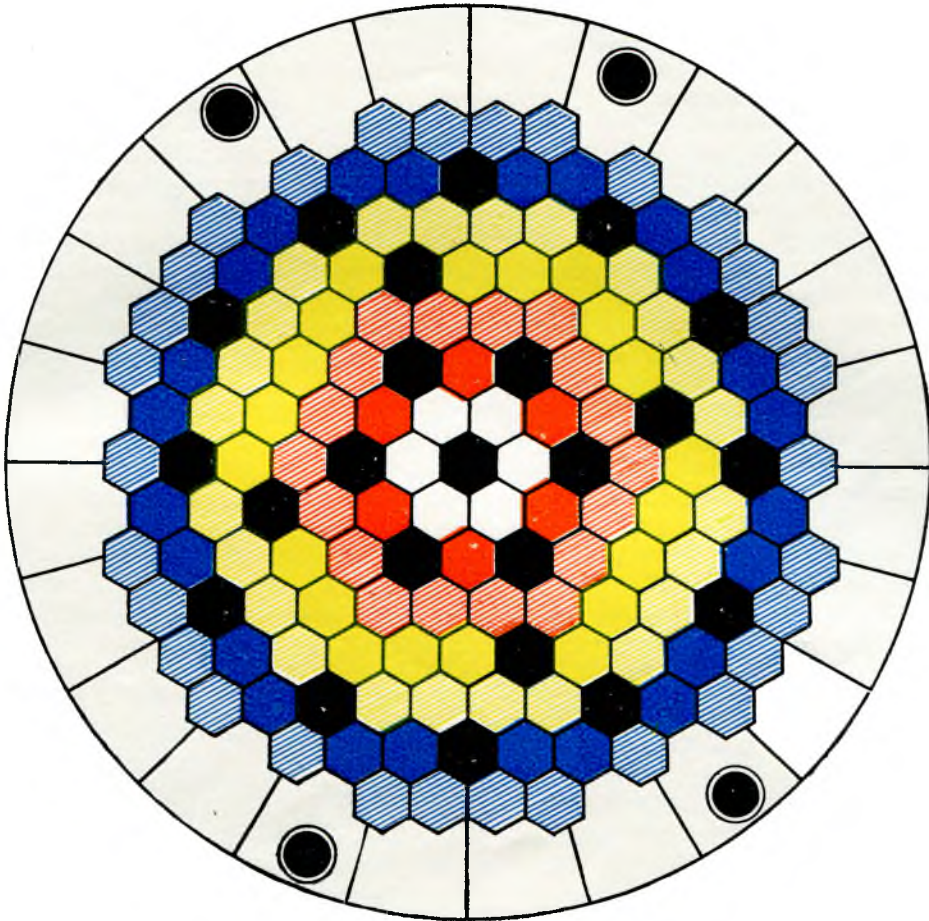


Рис. 2. Кольцевые зоны при частичной перегрузке каналов реактора.

может быть осуществлена и во время работы реактора.

Эта важная положительная особенность реактора с индивидуальными каналами позволяет рассчитывать работу электростанции с высоким числом часов использования в году, что благоприятно сказывается на стоимости вырабатываемой электроэнергии. Принцип индивидуального подвода теплоносителя к каналам начал применяться и за рубежом, например в швейцарском тяжеловодном реакторе с органическим теплоносителем [14], в усовершенствованном реакторе США с натриевым теплоносителем [15], в канадском тяжеловодном реакторе [16]. Таким образом, вариант конструкции гетерогенных реакторов с индивидуальной разводкой теплоносителя по каналам наряду с вариантом реактора, заключенного в прочный корпус, завоевал право на существование.

Известно, что на экономичность атомной электростанции существенно влияет величина единичной мощности агрегата: чем больше тепловая мощность реактора, тем дешевле при прочих равных условиях вырабатываемая электроэнергия. Наблюдаемая тенденция роста единичной тепловой мощности сооружаемых реакторов очевидна и понятна. Увеличение тепловой мощности реакторов происходит не только за счет интенсификации теплосъема, но в основном за счет увеличения размеров активной зоны. Возможности увеличения размеров активной зоны, а следовательно, и тепловой мощности реакторов с индивидуальной разводкой практически неограниченны, в то время как у корпусных реакторов эти возможности ограничены весьма сложными инженерными проблемами изготовления прочного корпуса.

Несмотря на использование для тепловыделяющих элементов нержавеющей стали, удается получить достаточно хороший баланс нейтронов. Коэффициент воспроизводства горючего в таких реакторах меняется в пределах 0,50—0,65, т. е. не уступает реакторам водо-водяного типа.

Какими бы показателями ни обладала ядерноэнергетическая установка, от нее прежде всего требуется надежность в работе и безопасность для обслуживающего персонала и населения окружающих районов.

Техника безопасности требует, чтобы при конструировании реакторной установки были предусмотрены специальные меры, обес-

печивающие безопасность работы установки. Важно также, чтобы расходы на эти меры не великли за собой чрезмерного увеличения стоимости электроэнергии.

В частности, немалая доля капитальных затрат приходится на защитную оболочку атомной электростанции, если защитная оболочка применяется в проекте реактора. На Первой атомной электростанции и в проекте Уральной станции защитная оболочка не применяется. Это неслучайно, так как принцип индивидуальной разводки теплоносителя по каналам реактора обеспечивает взрывобезопасность реактора. Если в реакторах корпусного типа потенциальная энергия сконцентрирована в большом единичном объеме корпуса и в случае аварии может выделиться сразу в большом количестве, то в реакторах с отдельными каналами возможность такой аварии исключается. Пятилетний опыт надежной работы Первой атомной электростанции служит серьезным аргументом в пользу безопасности реакторов такого типа и свидетельствует о нецелесообразности применения для них защитных оболочек. Опыт экспериментальных работ, при которых происходили случаи нарушения целостности тепловыделяющих элементов, показал, что никакой опасности радиоактивного заражения помещений станции и окружающей территории не возникает.

В целом эксплуатация Первой атомной электростанции показала, что для реакторов подобного типа обеспечение благоприятной радиационно-биологической обстановки как для обслуживающего персонала, так и для населения окружающих населенных пунктов не сопряжено с большими затратами и значительными инженерными трудностями.

Эксплуатация Первой атомной электростанции явилась школой для формирования кадров эксплуатационников. Успешной работе станции в большой степени способствовало то, что ее эксплуатацией руководили А. Н. Григорьянц, Г. Н. Ушаков, Л. А. Кочетков, В. Т. Лыткин и др.

Таким образом, отмечая пятилетнюю годовщину со времени пуска Первой в мире атомной электростанции, нельзя не признать, что она сыграла важную общественную и техническую роль в развитии ядерной энергетики и стала родоначальницей широкого класса реакторов.

Поступила в Редакцию 27/IV 1959 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. И. Блохинцев, Н. А. Николаев. Реакторостроение и теория реакторов. Доклады советской делегации на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1955). Изд-во АН СССР, 1955, стр. 3.
2. Д. И. Блохинцев, Н. А. Доллежалъ, А. К. Красин. Атомная энергия, № 1, 10 (1956).
3. Н. А. Доллежалъ, А. К. Красин, Н. А. Николаев, А. Н. Григорьянц, Г. Н. Ушаков. Тр. Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958). Т. 2—Ядерные реакторы и ядерная энергетика. Атомиздат, 1959, стр. 15.
4. Н. А. Доллежалъ и др. Там же, стр. 36.
5. Н. А. Доллежалъ. Атомная энергия, III, № 11, 391 (1957).
6. А. Н. Григорьянц. Атомная энергия, II, № 2, 109 (1957).
7. K. Mitchell, R. Geary. The High Temperature Energy Reactor «Zenith». Доклад № 1463, представленный Англией на Вторую международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958).
8. R. Moore, H. Kronberger, L. Grainger. Advances in the Design of Gas-Cooled Graphite-Moderated Power Reactors. Доклад № 312, представленный Англией на Вторую международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958).
9. R. Charpie, M. Bender, A. Fraas, W. Furgerson, W. Jordan, W. Manli, R. Meghreblian, A. Perry, R. Schultheiss. Design Study for a Graphite-Moderated Gas-Cooled Reactor Using Partially Enriched Uranium. Доклад № 950, представленный США на Вторую международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958).
10. Атомная техника за рубежом, № 3, 85 (1959).
11. Nuclear Reactor Plant Data. ASME, 1958.
12. Nucleonics, 17, No. 3, 63 (1959).
13. W. Zinn, J. West, G. Tavernier. A 125-MW Indirect Cycle Boiling Water Reactor. Доклад № 1801, представленный Англией на Вторую международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958).
14. W. Hälg, Th. Schaub. Diphenyl Cooled, Heavy Water Moderated, Natural Uranium Reactor Prototype. Доклад № 259, представленный Швейцарией на Вторую международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958).
15. S. Levy, B. Voorhees, P. Aline, K. Cohen. Advanced Design of a Thermal Sodium Cooled Reactor for Power Production. Доклад № 604, представленный США на Вторую международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958).
16. H. Smith, W. Walker, N. Williams, E. Critoph. A Study of a Full-Scale Uranium and Heavy Water Nuclear Power Plant. Доклад № 208, представленный Канадой на Вторую международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958).

