

КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС¹

Доктор технических наук В.Е. ЮРИН
(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Саратовский научный центр РАН)

DOI: 10.7868/50233361921120053

Экологически чистая атомная энергетика является решением многих проблем человечества: обеспечение энергией на многие десятилетия, снижение вредных выбросов в атмосферу, образующихся в результате сжигания органического топлива, электроснабжение и отопление далеко расположенных районов, вплоть до освоения космоса при определённой доработке имеющихся технологий. Однако все преимущества “мирного атома” сводятся на нет при возникновении крупных аварийных ситуаций. Произошедшая в 2011 г. крупная радиационная авария на АЭС Фукусима-1 подтверждает актуальность проблемы безопасности атомных станций и в настоящее время². Согласно “Основам государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу”, утверждённым Указом Президента Российской Федерации от 13 октября 2018 г. № 585, “Ядерная и радиационная безопасность является

одной из важнейших составляющих национальной безопасности Российской Федерации”.

На действующих АЭС аварийное электроснабжение собственных нужд в условиях обесточивания производится посредством дизель-генераторов. Крайне редкое использование резервных агрегатов в аварийных ситуациях требует весомых затрат на поддержание их в рабочем состоянии. Быстрые запуск и нагружение отрицательно сказываются на надёжности дизель-генераторов. Экспериментальное исследование причин незапуска дизель-генераторов на атомных станциях и анализ статистики действующих АЭС, проведённые учёными США и Канады³,

¹ Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (соглашение № 19-08-01053 А).

² Mycle Schneider. *The World Nuclear Industry Status Report 2014* / Mycle Schneider, Antony Froggatt et al. // A Mycle Scheneider Consulting Project. Paris, London, Washington, D.C., July 2014.

³ Samanta Pranab & Kim Inn Seock & Uryasev Stan. *Emergency diesel generator: Maintenance and failure unavailability, and their risk impacts. Report NUREG / CR – 5994 of the Brookhaven National Laboratory*, Vol. 26, Nov. 1994; Battle R.E. *Emergency ac power systems operating experience at US nuclear power plants-1976 through 1983. Nuclear Energy Agency of the OECD. Report NEA-CSNI-R1986-115 of the operated by Martin Marietta Energy Systems, Inc., for U.S.* Vol. 47, 1986; U.S. Nuclear Regulatory Commission, *SECY-93-044, for the Commission from James M. Taylor, NRC Executive Director for Operations, Subject: Resolution of Generic Safety Issue B56, “Diesel Generator Reliability”, 1993; Winfield D.J., & McCauley G.M. CRL Research Reactor Diesel Generator Reliability Study 1960–1992. Atomic Energy of Canada Limited Research. Chalk River Laboratories Chalk River, Ontario, Canada. Vol. 2, 1994.*

показали, что процент незапуска может достигать 4%, что значительно выше паспортных данных этих агрегатов. Ещё одним отрицательным фактором является то, что на первом этапе аварийного расхолаживания пар, генерируемый в парогенераторах станции, выбрасывается в атмосферу.

На следующем этапе повышения безопасности атомных станций были разработаны и введены в эксплуатацию на ряде энергоблоков системы пассивного отвода тепловыделения (СПОТ). Они позволяют расхолаживать реактор, отводя тепло в атмосферу через специальные воздушные или водяные теплообменные установки без использования внешних источников энергии благодаря явлению естественной циркуляции. Однако это привело к значительному росту капитальных вложений в АЭС и затрат на поддержание СПОТ в рабочем состоянии. К негативным факторам СПОТ также относится зависимость эффективности таких систем от погодных условий⁴.

В 2020 г. автором статьи защищена диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук на тему "Разработка научных основ обеспечения безопасности атомных электрических станций на основе комбинирования с многофункциональными энергогенерирующими установками" (научный консультант – Заслуженный деятель науки и техники РФ, д.т.н., профессор Р.З. Аминов). В диссертации предложен новый взгляд на поиск путей обеспечения безопасности атомных станций с учётом факторов экономичности

и работоспособности в условиях работы АЭС в энергосистемах с неравномерным графиком энергопотребления. Разработаны многофункциональные резервные установки, полностью окупающие затраты посредством генерации дополнительной электроэнергии в сеть в штатном режиме. Представлены основы методологии, позволяющей провести исследование путей совершенствования атомных электростанций на основе комплексного анализа экономической эффективности, безопасности и системных эффектов, достигаемых при модернизации энергоблоков АЭС, в том числе при установке дополнительного оборудования⁵.

Согласно Благодарственному письму от Главного учёного секретаря Высшей аттестационной комиссии при Минобрнауки России за подготовку хорошей научной работы, диссертация аннотирована в Вестнике ВАК как одна из лучших в 2020 г. Хотелось бы отдельно отметить, что ранее по предложению профессора Р.З. Аминова Балаковскую атомную станцию и Саратовскую гидроэлектростанцию соединили резервными электрическими линиями на генераторном напряжении, что является примером реализации многофункционального резервирования.

Расхолаживание реакторов АЭС с использованием энергии остаточного тепловыделения

Мощность остаточного тепловыделения остаётся на высоком уровне даже спустя несколько дней после останова реактора. Уровень мощности зависит от обогащения свежего топлива, плотности энерговыделения

⁴ Коршунов А.С., Таранов Г.С. НВАЭС-II: Обоснование пассивных систем безопасности. РЭА Росэнергоатом. 2008. № 6; Мильман О.О., Птахин А.В., Кондратьев А.В. и др. Пуск воздушно-конденсационных установок и сухих градирен при отрицательных температурах охлаждающего воздуха // Теплоэнергетика. 2016. № 5; Аминов Р.З., Егоров А.Н. Сопоставление и анализ систем отвода остаточного тепловыделения реакторов в аварийных ситуациях с обесточиванием // Атомная энергия. 2016. Т. 121. Вып. 6.

⁵ Юрин В.Е. Разработка научных основ обеспечения безопасности атомных электрических станций на основе комбинирования с многофункциональными энергогенерирующими установками: дис. ... докт. техн. наук: 05.14.01. СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов, 2020.

в активной зоне и режима облучения тепловыделяющих сборок. Динамика мощности остаточного тепловыделения по данным Балаковской АЭС показана в зависимости от кампании (время работы реактора с одной и той же загрузкой ядерного топлива) ВВЭР-1000 на рис. 1.

Чтобы исключить потерю рабочего тела⁶ через предохранительные клапаны второго контура и снизить риск отказа систем аварийного электроснабжения, питание потребителей АЭС можно обеспечить за счёт дополнительной турбоустановки небольшой мощности. Энергия остаточного тепловыделения активной зоны реактора может быть использована для генерации в парогенераторах АЭС пара, способного в аварийном режиме стать рабочим телом для дополнительной турбины. Автономность электроснабжения собственных нужд обеспечивается возможностью использования только энергии остаточного тепловыделения остановленного реактора без привлечения внешних энергоисточников⁷. Рассматриваемые системы также позволяют сохранять и полезно использовать рабочее тело АЭС, в отличие от штатных систем аварийного электроснабжения.

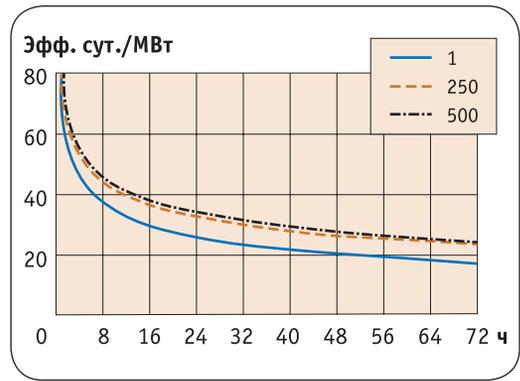


Рис. 1. Мощность остаточного тепловыделения при кампаниях (время работы реактора с одной и той же загрузкой ядерного топлива), МВт. (1 эфф. сут. – время работы реактора в течение одних суток на номинальной мощности).

Если вся генерируемая в штатном режиме на дополнительной паротурбинной установке (ПТУ) электроэнергия будет направляться в энергосистему, при обесточивании АЭС дополнительная ПТУ будет также отключена системой автоматической защиты. На запуск дополнительной ПТУ потребуется время. Для того, чтобы избежать этого был разработан способ бесперебойного электроснабжения собственных нужд АЭС, по которому получен патент РФ на изобретение⁸. Бесперебойность электроснабжения достигается благодаря техническому решению подключения генератора дополнительной ПТУ к потребителям собственных нужд, которые должны находиться в работе при расхолаживании реактора (рис. 2). Это позволит дополнительной турбине при обесточивании станции оставаться в работе. Избыток генерируемого в парогенераторах пара может быть направлен через быстродействующую

⁶ В системе АЭС с водо-водяными реакторами имеются теплоноситель и рабочее тело. Теплоноситель – вода, циркулирующая в первом контуре при непосредственном контакте с активной зоной реактора под высоким давлением (более 16 МПа). Рабочим телом, совершающим во втором контуре энергоблока АЭС работу с преобразованием тепловой энергии в механическую посредством турбины, является водяной пар.

⁷ Юрин В.Е. Разработка научных основ обеспечения безопасности атомных электрических станций на основе комбинирования с многофункциональными энергогенерирующими установками: дис. ... докт. техн. наук: 05.14.01. СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов, 2020; Аминов Р.З., Юрин В.Е., Кузнецов Д.Ю. Исследование процессов расхолаживания водо-водяных реакторов на основе использования энергии остаточного тепловыделения для выработки электроэнергии в аварийных ситуациях с обесточиванием // Атомная энергия. 2020. Т. 128. Вып. 4.

⁸ Аминов Р.З., Юрин В.Е. Патент РФ № 2702100. Способ бесперебойного электроснабжения собственных нужд АЭС // Заявка на патент РФ № 2019100412 от 09.01.2019, опубл. 04.10.2019. Бул. № 28.

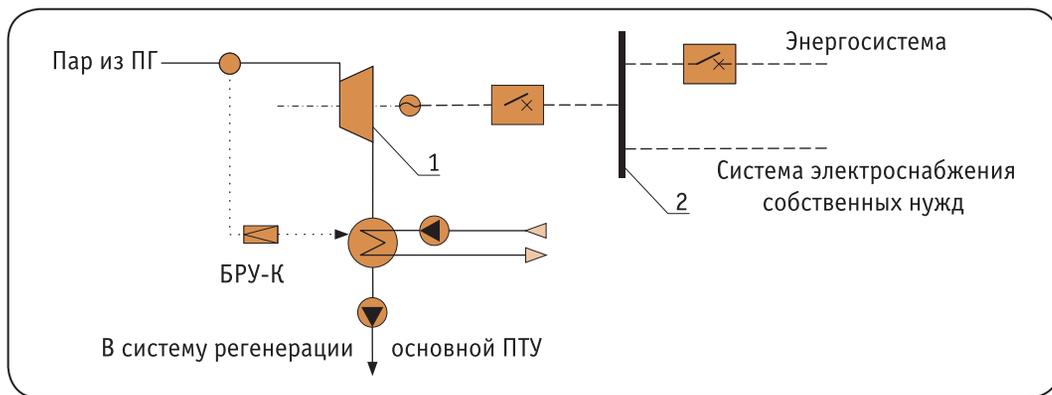


Рис. 2.
Схема бесперебойного электроснабжения собственных нужд АЭС.
1 – дополнительная паротурбинная установка; 2 – закрытое распределительное устройство; БРУ-К – быстродействующая редуцирующая установка со сбросом в конденсатор турбины.

редукционную установку в конденсатор дополнительной турбины.

Дополнительная паровая турбина может быть установлена в турбинном отделении для строящихся энергоблоков АЭС или в прилегающем здании для действующих. Главная задача – поместить турбину как можно ближе к парогенераторам, снизив риск отказов и тепловые потери из-за длинных паропроводов.

В соответствии с программой аварийного расхолаживания в условиях полного обесточивания в начальный момент времени при останове блока ВВЭР-1000 осуществляется сброс пара из второго контура в атмосферу. При этом запускается аварийный дизель-генератор и формируется сигнал на пуск одного из трёх аварийных питательных электронасосов для подпитки парогенераторов. Первый этап расхолаживания происходит, пока температура теплоносителя первого контура не достигнет 150 °С, после чего второй контур отключается, и расхолаживание осуществляется через систему ава-

рийного охлаждения активной зоны низкого давления⁹.

Как показывает практика эксплуатации четвёртого энергоблока Балаковской атомной станции, в процессе расхолаживания с отключёнными главными циркуляционными насосами (ГЦН) возможно длительное поддержание температуры теплоносителя первого контура на постоянном уровне за счёт снижения расхода и уровня рабочего тела в парогенераторах (рис. 3). Благодаря этому остаточное тепловыделение может отводиться длительное время через второй контур с получением пара со стабильными высокими параметрами, который может быть использован в качестве рабочего тела для маломощной паровой турбины. При этом в работе остаются аварийные потребители первой, второй групп и циркуляционный насос¹⁰. В первом контуре

⁹ Система аварийного охлаждения активной зоны низкого давления (CAOЗ НД) предназначена для отвода остаточного тепловыделения активной зоны реактора через первый контур (посредством насоса CAOЗ НД циркулирует теплоноситель, отдающий тепло реактора в теплообменник CAOЗ НД, откуда отвод тепла осуществляется технической водой из брызгального бассейна) в аварийном и плановом режимах расхолаживания при снижении температуры теплоносителя первого контура ниже 150 °С.

¹⁰ Аминов Р.З., Юрин В.Е., Кузнецов Д.Ю. Исследование процессов расхолаживания водо-водяных реакторов на основе использования энергии остаточного тепловыделения для выработки электроэнергии в аварийных ситуациях с обесточиванием // Атомная энергия. 2020. Т. 128. Вып. 4

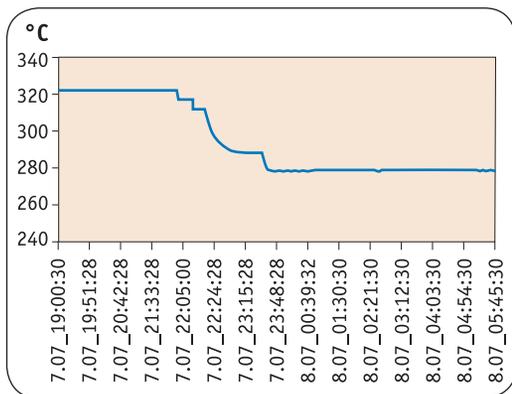


Рис. 3.
Температура теплоносителя на выходе из реактора, °C. Расхолаживание энергоблока БалАЭС № 4 с отключёнными ГЦН. 07.08.11–09.08.11.

будет обеспечиваться естественная циркуляция.

Выполнено исследование процесса расхолаживания реакторов ВВЭР-1000 с использованием вариантов установленной мощности дополнительной турбины 6 и 12 МВт. С целью обеспечения более высоких значений относительно внутреннего КПД¹¹ проточной части дополнительной турбины на разных уровнях мощности регулирование нагрузки может осуществляться скольжением давлением пара (регулировка давления обеспечивается посредством электрического аварийного питательного насоса для соблюдения баланса требуемой и генерируемой мощности) при полностью открытых регулирующих клапанах. При таком регулировании объёмный пропуск пара на входе в голову турбины остаётся практически неизменным. Результаты исследования продемонстрировали возможность отвода остаточного тепловыделения двух реакторов ВВЭР-1000 в течение 72 ч

¹¹ Относительный внутренний КПД турбины характеризует степень совершенства проточной части турбины и потери мощности (технической работы) в необратимом адиабатном процессе турбины.

без внешних дополнительных источников энергии с использованием только энергии остаточного тепловыделения одного из реакторов, в том числе, при разгерметизации первого контура на одном из реакторов¹².

Далее была укрупнённо (учтены факторы, оказывающие основное влияние на результаты исследования) оценена надёжность резервирования собственных нужд АЭС на основе постоянной действующей паровой турбины. Результаты исследований показали, что при совместном функционировании дополнительной паровой турбины и трёхканальной системы аварийного электроснабжения с дизель-генераторами достигается сопоставимый с системами пассивного отвода тепловыделения (СПОТ) уровень безопасности, удовлетворяющий действующим требованиям МАГАТЭ¹³. Таким образом, на строящихся АЭС целесообразна замена теплообменников СПОТ на дополнительную паровую турбину.

Экономический эффект от установки дополнительной паровой турбины

В штатном режиме работы для обеспечения бесперебойности электроснабжения собственных нужд дополнительная паровая турбина должна всегда находиться в работе. Для этого необходимо рабочее тело. При повышении мощности реакторных установок дополнительная паровая турбина могла бы стать достойной альтернативой модернизации основной турбины.

¹² См. сноску¹⁰.

¹³ Юрин В.Е. Разработка научных основ обеспечения безопасности атомных электрических станций на основе комбинирования с многофункциональными энергогенерирующими установками: дис. ... докт. техн. наук: 05.14.01. СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов, 2020; Токмачев Г.В. Подход к применению ВАБ при проектировании АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. 2007. Том 3. № 4.

Конечно, КПД проточной части дополнительной турбины, будет ниже, чем у основной турбины за счёт меньшего объёмного расхода пара, однако дополнительная паровая турбина может окупиться ещё на этапе строительства благодаря замещению более дорогостоящих теплообменников СПОТ. Кроме того, согласно данным Балаковской АЭС, капиталовложения в модернизацию основного оборудования значительно выше, чем в установку дополнительной паровой турбины. По этой причине, даже без учёта замещения СПОТ, дополнительная ПТУ будет окупаться быстрее, чем модернизация основного турбогенератора¹⁴.

Альтернативным вариантом получения дополнительного рабочего тела на АЭС для функционирования дополнительной турбины может стать комбинирование АЭС с системами аккумулирования. Автором, совместно с научными сотрудниками Отдела энергетических проблем Саратовского научного центра РАН, разработаны технические решения аккумулирования энергии на АЭС: химического на основе автономного водородного комплекса и теплового на основе аккумуляторов фазового перехода¹⁵. Согласно разработанным решениям, во внепиковые часы нагрузки производимая реакторами энергия может аккумулироваться (производство водорода

и кислорода посредством электролизеров при использовании электрической энергии с генератора турбины АЭС или нагрев теплоаккумулирующего вещества отбором свежего пара из парогенераторов АЭС) и в часы повышенной нагрузки использоваться для производства дополнительного количества пара. При этом обеспечивается работа реакторных установок с постоянным коэффициентом использования установленной мощности (КИУМ).

Согласно Энергетической стратегии¹⁶, должно быть обеспечено участие атомных электростанций нового поколения в регулировании неравномерности суточных графиков нагрузки. Это разумное следствие увеличения доли АЭС в Единой энергосистеме РФ. Однако такие меры приведут к значительному снижению конкурентоспособности АЭС на энергетическом рынке ввиду экономической необходимости работы атомных станций с максимальным коэффициентом использования установленной мощности по причине значительных капиталовложений при низкой цене на ядерное топливо. Решением может стать аккумулирование избыточной ночной электроэнергии, тарифы на которую могут быть значительно ниже среднесуточных, с последующим использованием её для генерации электроэнергии в часы повышенной нагрузки. Разработанные системы аккумулирования позволяют получить дополнительный пар, который может быть использован в качестве рабочего

Согласно Энергетической стратегии, должно быть обеспечено участие атомных электростанций нового поколения в регулировании неравномерности суточных графиков нагрузки. Это разумное следствие увеличения доли АЭС в Единой энергосистеме РФ.

¹⁴ Аминов Р.З., Егоров А.Н., Юрин В.Е., Бессонов В.Н. Многофункциональное резервирование собственных нужд атомных электростанций // Атомная энергия. 2016. Т. 121. Вып. 5.

¹⁵ Юрин В.Е. Разработка научных основ обеспечения безопасности атомных электрических станций на основе комбинирования с многофункциональными энергогенерирующими установками: дис. ... докт. техн. наук: 05.14.01. СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов, 2020.

¹⁶ Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 N 1523-р Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года.

тела маломощной паровой турбины. В диссертации В.Е. Юрина¹⁷ показаны системные условия высокой экономической эффективности разработанных систем аккумулирования при установке на АЭС с ВВЭР-1000 на примере ЕЭС РФ и зарубежных энергосистем.

Методология комплексного исследования путей совершенствования АЭС

Исследование современных и перспективных атомных станций показало необходимость разработки методологии поддержки принятия решений по дальнейшему развитию атомной энергетики с учётом выполнения растущих требований безопасности в условиях рыночной экономики и неравномерности электропотребления. С этой целью автором разработаны основы методологии комплексного исследования путей совершенствования АЭС на основе системы удельных показателей, определяющих значение эффектов от изменения экономической эффективности, безопасности (изменение вероятного ущерба) и системных эффектов (например, возможности вытеснения природного газа из энергопотребления в ЕЭС РФ с увеличением его экспорта) к единице капиталовложений в модернизацию АЭС, включая установку новых систем, благодаря которой достигаются эти эффекты. Одинаковая размерность разработанных показателей позволяет складывать полученные для разных эффектов удельные показатели и оценивать таким образом комплексную эффективность модернизации АЭС. Такой подход даёт возможность комплексно сравнивать одноцелевые установки с многоцелевыми. Подробно разработанные основы методоло-

гии комплексного исследования путей совершенствования АЭС показаны в работах¹⁸.

Результаты комплексного исследования путей совершенствования АЭС

Проведённое исследование показало, что наиболее эффективным решением является установка на новых энергоблоках дополнительных многофункциональных паровых турбин малой мощности вместо теплообменников систем пассивного теплоотвода, что приведёт к уменьшению капиталовложений в атомную станцию и повышению её эффективности. Таким образом будет решена одна из основных заявленных в Российской атомной энергетике задач – снижение удельных капиталовложений в атомные станции при обеспечении высокого уровня их безопасности, что будет способствовать повышению конкурентоспособности Российских АЭС на мировом рынке ядерной энергии.

Высокую эффективность также показывает установка передвижных аварийных дизель-генераторных станций благодаря их относительно низкой стоимости. Однако низкая надёжность (достаточно вспомнить результаты экспериментов в США и Канаде, показавших, что процент незапуска дизель-генераторов может до четырёх раз превышать паспортные данные) при недостаточной, зачастую недостоверной статистике отказов, ставит под

¹⁷ См. сноску 15.

¹⁸ Юрин В.Е. Разработка научных основ обеспечения безопасности атомных электрических станций на основе комбинирования с многофункциональными энергогенерирующими установками: дис. ... докт. техн. наук: 05.14.01. СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов, 2020; Юрин В.Е., Егоров А.Н., Москаленко А.Б., Муртазов М.А. Методика комплексного исследования эффективности путей совершенствования АЭС на примере сравнительного анализа автономного водородного энергокомплекса. Труды Академии энергии, 2020. № 2.

сомнение целесообразность и безопасность развития этого направления.

Для достижения возможности экономически эффективного участия АЭС в регулировании неравномерности энергопотребления эффективным решением может стать установка аккумулирующих систем, выбор которых будет зависеть от прогнозируемых тарифов на пиковую и полупиковую электроэнергию, а также от назначенного в связи с перегрузкой сети внепикового тарифа на электроэнергию. Эффективным решением может оказаться также установка на АЭС резервных установок, работающих на природном газе.

Одним из основных факторов, необходимых для определения приоритета установки газовых или аккумулирующих энергогенерирующих систем будет цена на газ (экспортная и внутренняя) и внимание государства к обеспечению возможности снизить внутреннее потребление газа с увеличением объёма

его продажи на экспорт. Подобные меры могут быть простимулированы государством в виде отчислений от продажи природного газа на экспорт, что позволит значительно улучшить экономическую привлекательность строительства аккумулирующих систем. Подобные меры необходимы для развития аккумулирующих установок в условиях сложившейся тарифной политики в Единой энергосистеме России. При этом государство, помимо процента прибыли от продажи замещаемого природного газа на экспорт, будет иметь ряд других положительных эффектов: обновление манёвренных мощностей ЕЭС; возможность увеличения доли атомных станций в энергосистеме, благодаря расширению регулируемого диапазона их использования; улучшение экологической ситуации за счёт снижения выбросов, образующихся в результате сгорания органического топлива.



naukapublishers.ru

ЭКСКЛЮЗИВНЫЙ ПЕРЕПЛЕТ

Рисунок на коже
Все виды тиснения
Кожаный переплет
Рельефное тиснение
Клише любой сложности
Полноцветная роспись обзоров
А также адресные папки, дипломы, футляры

Берёмся за работы любой сложности!

По всем интересующим вопросам пишите на почту kiseleva@tnauka.ru

реклама