

## **ОТЗЫВ**

### **ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА,**

доктора технических наук, профессора Дворецкого Дмитрия Станиславовича на диссертационную работу Налетова Владислава Алексеевича «Разработка multifunctionальных технологических систем переработки природных энергоносителей на основе их оптимальной организации», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям: 05.17.07 – Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ, 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

#### **Актуальность темы диссертационной работы**

Нельзя не согласиться с автором в том, что в условиях необходимости сохранения национальной идентичности Российской Федерации в настоящее время наибольшую актуальность приобретают вопросы обеспечения устойчивого развития высокоэффективных и конкурентоспособных промышленных технологий и человеческого капитала, достойные условия жизни существующего поколения и сохранение полноценной среды обитания для будущих поколений. При этом природные энергоносители остаются в настоящее время основными источниками сырья и энергии, а полезная работа энергоресурсов в современных технологиях составляет ~30%.

Объектом исследования в настоящей работе являются энергоемкие химико-технологические системы переработки природных энергоносителей и низкотемпературной сублимации диоксида углерода из очищенных дымовых газов. Модернизация действующих и создание новых энергосберегающих химико-технологических систем переработки природных энергоносителей, повышение их энергоэффективности и термодинамического КПД, минимизация вредных выбросов в окружающую среду и решение проблемы энергосбережения за счет когенерации требует разработки научно обоснованных подходов к анализу и синтезу таких систем.

Автор справедливо отмечает, что эволюционный закон К.Ф. Рулье выступает как общий закон оптимальной организации любого типа систем, априори обеспечивая их устойчивость и достижение ими

энергосберегающих показателей, не прибегая к частным критериям и частным постановкам задач. Поэтому диссертант вполне обоснованно сконцентрировал внимание на разработке теоретических и практических основ создания multifunctionальных химико-технологических систем, реализующих идею одновременного выполнения нескольких целевых функций. При этом реализация идеи multifunctionальности в технологиях должна привести к повышению их рентабельности в силу диверсификации продукции. Предметом исследования диссертационной работы Налетова В.А. являются теоретические основы и методология построения организованных multifunctionальных технологических систем переработки природных энергоносителей с максимальным термодинамическим КПД и наименьшими удельными расходами сырья, топливно-энергетических ресурсов, воздействиями на окружающую среду для отраслей топливно-энергетического комплекса, нефтегазо- и коксохимии.

Таким образом, можно заключить, что диссертационная работа Налетова В.А., посвященная разработке multifunctionальных технологических систем переработки природных энергоносителей на основе их оптимальной организации, является актуальной в научном и техническом плане.

Актуальность работы также подтверждается и тем, что она выполнена в соответствии с Федеральной целевой программой Министерства образования и науки Российской Федерации «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-2014 годы и на 2014-2020 годы», в том числе, по разработке энергоблоков с улавливанием диоксида углерода и высоким термодинамическим КПД (шифр «2011-1.6-516-023»), по получению товарного диоксида углерода из дымовых газов в энергоблоке тригенерации (шифр 2013-1.5-14-515-0043) и по газовым методам повышения нефтеотдачи месторождений в рамках выполнения проекта №14.583.21.0064 (уникальный идентификатор проекта RFMEF158317X0064).

### **Основное содержание работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, глоссария основных терминов и понятий, списка использованных

литературных источников и приложений, включая акты и заключения об использовании результатов исследования. Работа изложена на 487 страницах, включает 116 рисунков и 95 таблиц. Список использованной отечественной и зарубежной литературы содержит 283 наименования.

**Во введении** сформулирована цель работы, обоснована ее актуальность, приведена аннотация основных результатов работы, показана научная новизна и практическая значимость, даны рекомендации по реализации результатов исследований в промышленности и научно-инженерной практике.

**В первой главе** проведен подробный анализ научных подходов к оптимальной организации химико-технологических систем и актуальных задач переработки природных энергоносителей. В частности, рассмотрены вопросы иерархии критериев в задачах оптимальной организации химико-технологических систем на основе эксергетической, эксергоэкономической, информационно-термодинамической концепций и Пинч-анализа. Основное внимание уделено актуальным проблемам переработки природных энергоносителей и, в частности, способам восстановления работоспособности потоков на основе тепловых насосов и тепловых двигателей. Установлено, что для создания энергосберегающих технических решений по улавливанию диоксида углерода в условиях дефицита работоспособной энергии целесообразно использовать термодинамический цикл Ренкина в сочетании с криогенными процессами, позволяющими получать вещества высокой степени чистоты.

На основании критического обзора В.А. Налетов пришел к выбору научной парадигмы, положенной в основу разработки multifunctionальных технологических систем, заключающейся в необходимости количественной интерпретации взаимосвязи между организованностью и оптимальной дифференциацией функций систем между ее элементами, что позволяет определить теоретическую базу проводимого научного исследования.

**Вторая глава** посвящена развитию научных и методических основ системного подхода к анализу и синтезу multifunctionальных технологических систем в соответствии с выбранной парадигмой исследования, сформулированы задачи оптимальной организации multifunctionальных ХТС на основе дифференциации их функций между элементами и подсистемами. Диссертантом доказано, что характеристикой организованности при дифференциации функций

системы является энтропия информации, выраженная через статистический вес системы, мультипликативно связанный со статистическими весами элементов или подсистем, и совпадающая с энтропией Шеннона. В главе представлены методические разработки по выводу критериев организованности при элементном усложнении химико-технологических систем, имеющих смысл безразмерных стоимостей единицы информации потоков продукта, минимизация которых приводит к оптимальной организации ХТС.

Отдельный параграф посвящен методике оценки параметров макроуровня – весовых коэффициентов, учитывающих «место» процессов в структуре системы на основе вероятностей флуктуаций средних уровней их энергий. Предложенная стохастическая модель флуктуаций средних энергетических уровней процессов позволяет теоретически описать все возможные варианты распределения энергии между элементами в системе и установить оптимальный вариант их согласованного функционирования.

Показано, что оптимальная организация ХТС при увеличении в ней количества элементов связана с минимизацией критериев усложнения системы, выраженных через макро- и микрохарактеристики процессов и позволяющих идентифицировать их принадлежность определенным маршрутам движения технологических потоков, а оптимальная организация многопоточных элементов ХТС должна осуществляться на основе уравнительного метода распределения затрат на организацию процессов или метода выделения.

Разработаны стратегия и алгоритм оптимизации химико-технологических систем с заданным типом и множеством (количеством) элементов на основе декомпозиции задачи по иерархическим уровням в соответствии с принципом сверху-вниз, а также стратегия и алгоритмы проектирования (синтеза) неоднородных организованных ХТС в условиях неопределенности их элементной и топологической структур. При этом достигается возможность оптимального согласования условно объединенных целевых процессов в рамках виртуальных систем по общим правилам дифференциации функций ХТС между элементами и подсистемами с целью сокращения в дальнейшем количества вспомогательных согласующих элементов энергетического звена, которые предлагаются к использованию при создании (проектировании) организованных мультифункциональных технологических систем.

**В третьей главе** осуществляется разработка multifункциональных технических решений по переработке природных энергоносителей с применением научных и методических основ, разработанных в главе 2.

Большой интерес представляют результаты оригинальных научных исследований, выполненных В.А. Налетовым, по интенсификации теплоотдачи в отопительных простенках и разработке multifункциональной отопительной системы печей коксования; оптимальной организации процессов пылеугольной газификации бурого угля и конверсии синтез-газа, интегрированной системы газификации бурого угля и конверсии в технологии получения метанола и высших спиртов; разработке multifункциональной технологической системы энерготехнологического использования попутного нефтяного газа месторождений арктического шельфа и multifункциональных технических решений по повышению эффективности транспортировки природного газа на компрессорных станциях.

В главе показано, что стратегия и алгоритмы проектирования (синтеза) неоднородных организованных ХТС в условиях неопределенности их элементной и топологической структур позволяют оптимально согласовать условно объединенные целевые процессы по общим правилам дифференциации функций ХТС между элементами и подсистемами с целью сокращения в дальнейшем количества вспомогательных согласующих элементов энергетического звена.

Диссертантом получены принципиально новые и перспективные технические решения по оптимальной организации химико-технологических систем на примерах технологий переработки природных энергоносителей с улучшенными эксплуатационными показателями: multifункциональное техническое решение для обеспечения промышленных площадок месторождений арктического шельфа теплотой, электроэнергией и диоксидом углерода в жидком или сверхкритическом состояниях для целей повышения нефтеотдачи; оптимальная организация линейных компрессорных станций по транспортировке природного газа на объектах ПАО «Газпром», подсистемы рекуперации теплоты дымовых газов Хабаровского НПЗ в рамках поставки рекуператора по программе модернизации нагревательных печей АО «ННК ХАБАРОВСКИЙ НПЗ; программный комплекс по оценке термодинамической эффективности технических решений теплоэнергетических систем на Бушевецком заводе

г. Бологое (ООО «Бушевецкий завод»); выбор оптимальных технологических и конструктивных параметров осуществления процессов пылеугольной газификации и конверсии синтез-газа и газотурбинных установок на Челябинском турбинном заводе по заданию АО «СКБ Турбина».

Практически все результаты научного исследования имеют ярко выраженный практический характер и приняты к реализации, что подтверждается актами, заключениями, протоколом испытаний, которые даны в приложении диссертации.

**Четвертая глава** посвящена разработке перспективного способа и процесса получения товарного диоксида углерода из очищенных дымовых газов в энергоблоке тригенерации нового поколения

В главе подробно рассмотрены вопросы оптимальной организации подсистемы рекуперации теплоты дымовых газов на основе цикла Ренкина при использовании широкого круга низкокипящих рабочих тел класса легких углеводородов от метана до пентана с разными модификациями их структуры. Автором предложено новое техническое решение на основе совмещения функций регенератора цикла Ренкина и десублиматора холодильного цикла в одном аппарате путем перенесения затрат на подогрев рабочего тела в подсистему улавливания диоксида углерода с использованием предложенного метода «выделения» в распределении затрат. Энергоблок тригенерации обеспечивает глубокую степень улавливания диоксида углерода из очищенных дымовых газов и выработку дополнительных количеств электроэнергии и холода при отсутствии теплового загрязнения окружающей среды.

Проведены экспериментальные исследования процесса низкотемпературной десублимации диоксида углерода из газовой смеси  $\text{CO}_2\text{-N}_2$ , оценка влияния различных технологических параметров на степень десублимации при различных содержаниях диоксида углерода от 5 до 10 об.% и анализ полученного десублимата на предмет соответствия его стандартам на технический продукт. Доказано, что в процессе низкотемпературной десублимации из дымовых газов возможно получать товарный диоксид углерода. Разработана методика технической реализации процесса получения товарного диоксида углерода в энергоблоке тригенерации нового поколения производительностью до 160 тыс. тонн диоксида углерода в год.

**В пятой главе** приводится оценка синергетического эффекта технологической системы получения товарного диоксида углерода из дымовых газов (блока тригенерации) на основе эксергетических показателей и финансовая оценка инвестиционного проекта «Получение товарного диоксида углерода в энергоблоке тригенерации производительностью до 160 тыс. тонн продукта в год». Технико-экономическая оценка мультифункционального процесса получения товарного диоксида углерода из дымовых газов и его сравнение с современными зарубежными аналогами показало, что предложенный способ позволяет достичь синергетический эффект (когда эксергетический КПД интегрированной системы (модуля) превышает наибольшее значение эксергетического КПД отдельной подсистемы этого модуля) и превосходит лучшие зарубежные аналоги по критерию удельного выброса  $\text{CO}_2$  на единицу мощности ( $\text{кг CO}_2/\text{кВт}$ ).

**В приложении** представлены интерфейсы различных расчетов, приведенных в работе, копии патентов РФ и свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, а также акты внедрения результатов исследований и протокол испытаний программного продукта.

Работа аккуратно оформлена, написана хорошим техническим языком. В ней использован большой объем научной литературы по рассматриваемой проблеме.

#### **Научная новизна диссертационной работы**

В работе В.А. Налетова проведены исследования, позволившие получить ряд оригинальных результатов, к которым в первую очередь можно отнести:

- научные и методические основы организации мультифункциональных энергоемких химико-технологических систем на основе развития информационно-термодинамической концепции, оптимальной дифференциации функций между элементами и подсистемами;
- новые критерии организованности ХТС, имеющие смысл безразмерных стоимостей единиц информации (по аналогии с эксергетическим подходом), которые позволяют осуществить выбор оптимальных технологических решений по мере увеличения в системе количества элементов; методики оценки их характеристик на макро- и микроуровнях;

- стратегии и алгоритмы оптимальной организации (оптимизации) однородных ХТС на основе критерия макроэнтропии, ХТС с заданным типом и множеством элементов и ХТС в условиях неопределенности их элементной и топологической структур;
- научное обоснование применения больших коэффициентов рециркуляции совместно с когенерацией и минимизацией выбросов оксида азота в коксовом производстве, двухступенчатой высокотемпературной конверсии в интеграции с пылеугольной газификацией бурого угля в производстве метанола и высших спиртов, цикла Ренкина с гипотетическим генератором в интеграции с улавливанием диоксида углерода для совмещения задач энергосбережения, охраны окружающей среды и повышения рентабельности добычи нефти на шельфах, включая арктический шельф;
- квазистационарная математическая модель процесса низкотемпературной десублимации диоксида углерода из очищенных дымовых газов;
- новые технические решения по организации отопительной системы печи коксования на основе совмещения рециркуляции, когенерации и ступенчатой подачи воздуха; объединенной системы газификации бурого угля и конверсии для получения синтез-газа заданного состава; блока тригенерации получения электроэнергии, холода и диоксида углерода из дымовых газов объектов электроэнергетики, металлургии, химии, нефтехимии, коксохимии и других на основе совмещения цикла Ренкина и холодильного цикла.

### **Практическая значимость диссертационной работы**

В диссертационной работе В.А. Налетова на основании выполненных теоретических обобщений получен ряд важных практических результатов, к которым в первую очередь можно отнести:

- способ интенсификации процесса теплоотдачи в отопительных каналах печных камер коксового производства на основе искусственной турбулизации потоков;
- способ принудительной рециркуляции газовых потоков в отопительных каналах с кратностями, более чем вдвое превышающими



применяемые на практике значения, в совокупности с когенерацией и минимизацией выбросов термических оксидов азота;

- способ получения электроэнергии, холода и диоксида углерода из дымовых газов объектов электроэнергетики, металлургии, химии, нефтехимии, коксохимии и других на основе совмещения цикла Ренкина и холодильного цикла, в котором подтвержден синергетический эффект тригенерации, новизна которого подтверждена патентом РФ;

- рекомендации по конструктивным характеристикам элементов кирпичной кладки отопительных простенков печей, позволяющих повысить коэффициент теплоотдачи конвекцией в 1,7 раза для интенсификации процесса коксования и сокращения расхода коксового газа на процесс;

- multifunctional отопительная система для горизонтальных печных камер с нижним подводом теплоносителя, позволяющая обеспечить равномерный прогрев коксового пирога, получить дополнительно до 3 МВт электрической мощности на батарею и снизить концентрацию термических оксидов азота в выхлопных газах с 88,2 до 0,63 мг/м<sup>3</sup>;

- технологическая схема газификации бурого угля в интеграции с двумя высокотемпературными ступенями конверсии в технологии получения метанола и высших спиртов, которая обеспечивает повышение эксплуатационных характеристик по сравнению с существующими технологическими аналогами;

- multifunctional установка на попутном нефтяном газе для интенсификации и повышения рентабельности нефтедобычи на месторождениях арктического шельфа;

- программно-алгоритмический комплекс оптимальной организации теплоэнергетических систем, а также технические предложения по оптимальной организации линейных компрессорных станций по транспортировке природного газа, созданию опытных образцов газотурбинных агрегатов и модернизации системы рекуператора с нагревательной печью для нефтеперерабатывающих заводов;

- методика технической реализации процесса получения товарного диоксида углерода из дымовых газов производительностью до 160 тыс. тонн продукта в год в энергоблоке тригенерации для объектов

электроэнергетики, металлургии, химии, нефтехимии, коксохимии и других, использующих ископаемые топлива, и проект технического задания на процесс;

- программные комплексы по расчету цикла Ренкина и процесса низкотемпературной десублимации диоксида углерода, защищенные свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ;

- финансовый план инвестиционного проекта по получению товарного диоксида углерода из дымовых газов производительностью до 160 тыс. тонн продукта в год, на основании которого подтвержден срок его окупаемости до 6 лет.

**Результаты диссертационного исследования и выводы** могут быть рекомендованы к использованию высшими учебными заведениями Москвы, Санкт-Петербурга, Тамбова. Иванова, Воронежа, Казани и другими образовательными центрами, институтами системы РАН, бюджетными учреждениями науки, проектными институтами и КБ, а также ведущими акционерными обществами металлургического и нефтегазового комплексов.

#### **Достоверность научных положений и выводов**

Теоретические исследования выполнены с использованием известных математических подходов, кинетических закономерностей и основаны на фундаментальных законах термодинамики. Автором использована передовая отечественная и зарубежная методология моделирования и оптимизации сложных химико-технологических процессов на основе предложенных оригинальных критериев и методик их расчета.

Достоверность результатов подтверждена параллельными расчетами по авторским программам и с использованием коммерческого пакета прикладных программ ChemCAD. Полученные результаты не противоречат известным результатам отечественных и зарубежных исследователей, а также подтверждаются удовлетворительным согласованием с авторскими экспериментальными данными.

Экспериментальные исследования выполнены на достаточно высоком уровне с использованием современных методов регистрации, анализа и обработки данных.

Все это позволяет считать предложенный автором диссертации подход и полученные результаты, а также сделанные выводы установленными научными фактами.

### **Замечания**

1. Научная проблема и основные задачи исследования сформулированы диссертантом предельно кратко во введении диссертации. На наш взгляд, более логичным было бы сформулировать задачи исследования в развернутом виде в заключительном параграфе обзорной главы 1 после критического обзора научных подходов к оптимальной организации ХТС и актуальных задач переработки природных энергоносителей.

2. Как-то неожиданно глава 2 начинается с решения задачи по дифференциации функций ХТС, а не с постановки этой задачи. В главе 2 не приводятся и постановки других задач, например, по дифференциации функций многоцелевых процессов между потоками и функций системы между ее элементами.

3. В параграфе 2.1 не приводится обоснование 3-х уровневого представления ХТС (рис. 2.1), встречаются некорректные термины, например такие как, "модель нешенноновской информации", "модель шенноновской информации" (на самом деле речь идет о моделях информационного процесса), "вероятность исхода в информационной задаче..."? (какую задачу имеет в виду автор при отсутствии ее постановки?), "Эти обстоятельства нашли свое отражение в количественном определении вероятностей уровней и исходов на основании распределения Больцмана..." (почему распределения Больцмана при отсутствии обоснования?), "Выражение (2.9) совпадает с энтропией информации Шеннона" и т.п.

4. Автором предложено два метода распределения затрат между потоками на примере теплообменных элементов (параграф 2.4), которые можно использовать в задачах оптимальной интеграции тепловых потоков в ХТС аналогично методу Пинч-анализа. Хотелось бы получить рекомендации, в каких случаях целесообразно использовать метод «выделения», а в каких – «уравнительный» метод.

5. Из работы не ясно, можно ли считать разработанные автором стратегии и алгоритмы для оптимальной организации

мультифункциональных (да и любых) ХТС (параграф 2.7) универсальными?

6. В диссертации представлено избыточное количество технологических объектов. Работоспособность научного подхода достаточно было показать на примерах ряда типовых процессов переработки природных энергоносителей, например, коксование, газификация, конверсия.

7. В работе нет обоснования выбора формы турбулизаторов на элементах кирпичной кладки простенков печных камер для интенсификации процесса коксования (параграф 3.3.1, рис. 3.3).

Отмеченные недостатки не влияют на основные теоретические и практические результаты диссертации. Диссертация написана соискателем самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации В.А. Налетова в науку. В диссертации приводятся сведения о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов.

### **Заключение**

Тематика исследования, цель и задачи работы, научная новизна, методы и способы, используемые в работе, подтверждают ее соответствие паспортам научных специальностей 05.17.07 и 05.17.08.

По специальности 05.17.07 – Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ: п.2 «Технологии и схемы процессов переработки нефтяного сырья на компоненты. Конструктивное оформление технологий и основные показатели аппаратуры установок для переработки сырья. Технологии подготовки нефти к переработке. Энергосберегающие технологии. Технологии приготовления товарных нефтепродуктов»; п.8 «Разработка новых процессов переработки органических и минеральных веществ твердых горючих ископаемых с целью получения продуктов топливного и нетопливного назначения»; п. 9 «Научные основы промышленного процесса коксования углей. Теория формирования кускового кокса, пластического состояния, спекание углей и угольных шихт. Новые способы подготовки углей к производству кокса и химических продуктов коксования. Производство углеродистых восстановителей и сорбентов. Непрерывные способы коксования.

Разработка путей и способов сохранности огнеупорной кладки коксовых печей»; п.12 «Экологические аспекты переработки топлив. Разработка технических и технологических средств и способов защиты окружающей среды от вредных выбросов производств по переработке топлив».

По специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химической технологии: «Методы изучения и создания ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности, обеспечивающие минимизацию отходов, газовых выбросов и сточных вод. Принципы и методы синтеза ресурсосберегающих химико-технологических систем с оптимальными удельными расходами сырья, топливно-энергетических ресурсов и конструкционных материалов», а также «Способы, приемы и методология исследования гидродинамики движения жидкости, газов, перемещения сыпучих материалов, исследование тепловых процессов в технологических аппаратах и технологических схемах, исследования массообменных процессов и аппаратов».

На основании изложенного считаю, что диссертационная работа Налетова В.А. на тему: «Разработка мультифункциональных технологических систем переработки природных энергоносителей на основе их оптимальной организации», представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема разработки организованных мультифункциональных химико-технологических систем с наименьшими удельными расходами сырья, топливно-энергетических ресурсов и воздействиями на окружающую среду благодаря оптимальным условиям осуществления процессов и их согласованным функционированием в ХТС, имеющая важное хозяйственное значение, а также изложены новые научно-обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 40 рецензируемых научных изданиях, в том числе 20 публикаций - в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 2 патента РФ и 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 14 публикаций - в рецензируемых изданиях, входящих в индексируемые

международные системы SCOPUS и Web of Science. Единолично автором опубликовано 8 печатных работ, включая 1 монографию.

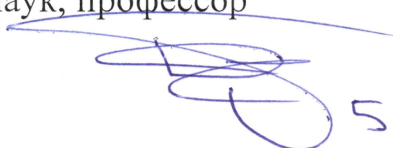
Автореферат полностью соответствует структуре и содержанию диссертации.

Таким образом, можно заключить, что работа соответствует критериям, установленным требованиями п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года (с изменениями и дополнениями), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Налетов Владислав Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальностям 05.17.07 – Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ, 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий.

Официальный оппонент: заведующий кафедрой «Технологии и оборудование пищевых и химических производств» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», доктор технических наук, профессор

Дворецкий

Дмитрий Станиславович



5.06.2018

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Тамбовский государственный технический университет»

392000, г. Тамбов, ул. Ленинградская, 1

Тел. 8 (4752) 639442, 637815

E-mail: dvoretzky@tambov.ru

Подпись проф. Дворецкого Д.С.

удостоверяю

Ученый секретарь ФГБОУ ВО «ТГТУ»

к.т.н.



Г.В. Мозгова

05.06.2018