

Отзыв официального оппонента

на диссертацию Хасанова Наримана Гаязовича

«Влияние неидеальности термодинамических свойств рабочих тел на процессы в ГТУ с промежуточным охлаждением воздуха», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность. В настоящее время уделяется много времени вопросы повышения эффективности энергетических установок, но поскольку рост максимальной температуры цикла сдерживается возможностью материаловедения, эффективностью систем охлаждения и экологическим аспектами, то все большую актуальность приобретает выбор рациональных параметров цикла, позволяющих обеспечить максимальную эффективность. При этом учет неидеальности свойств рабочего тела (особенно в случае больших степеней повышения давления или сложных циклов) позволяет уже на этапе проектирования определить корректные значения основных параметров цикла энергетических установок. Соответственно, вышесказанное позволяет сделать вывод об **актуальности** темы диссертации Н.Г. Хасанова.

Содержание работы. Работа содержит введение, три главы, заключение (основные результаты и выводы), список использованной литературы и приложения. Общий объем диссертации - 179 страниц. Объем автореферата диссертации - 16 страниц.

Во введении сформулированы актуальность, теоретическая и практическая значимость, цели и задачи диссертации.

В первой главе представлен обзор методов теплового расчета процессов адиабатного сжатия и расширения газа. Приведено сравнение уравнений состояния для реального и идеального газа, зависимостей для определения работы, теплоемкости и энтропии. Рассмотрены приближенные и точные методы расчета. Выполнен их анализ и определен метод достижения цели данной работы.

Во второй главе усовершенствован известный одномерный расчета, позволивший получить аппроксимационные уравнения зависимостей термодинамических свойств воздуха и продуктов сгорания в широком диапазоне параметров с низкой относительной погрешностью. Усовершенствована математическая модель расширения и сжатия реального газа в изоэнтропном приближении и показана методика правильного учета необратимости при расчете

по малым приращениям давления. Выполнена верификация по опубликованным результатам других исследователей.

В третьей главе рассмотрен вопрос оптимизации степени повышения давления в двухкаскадном компрессоре газотурбинной установки с промежуточным охлаждением. Приведены алгоритмы поиска оптимальных параметров цикла при различных накладываемых ограничениях и целевых функциях. Выполнен анализ влияния неидеальности рабочего тела и показаны тенденции изменения ошибки при различных наборах исходных данных.

В заключении представлены основные результаты и выводы, полученные автором, и приведены рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы исследования диссертационной работы.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов подтверждается актами о внедрении результатов диссертационной работы в систему оценки эффективности показателей парогазовой установки на Казанской ТЭЦ-2 (АО «ТАТЭНЕРГО») и в учебный процесс в рамках бакалаврской программы 13.03.03 «Энергетическое машиностроение» (ФГБОУ ВО «КГЭУ»).

Научная новизна. Наиболее важными достижениями является то, что:

- Разработана программа оптимизации общей и каскадной степени повышения давления в ГТУ с промежуточным охлаждением, учитывающая все проявления неидеальности газа и зависимость изоэнтропных КПД каскадов компрессора от их степеней повышения давления;
- Установлена связь между изоэнтропными КПД компрессора и его каскадов с учетом изменения термодинамических свойств рабочего тела в промежуточном охладителе на основании постоянства политропного КПД процесса;
- Показано, что модель идеального газа дает завышенные оптимальные степени повышения давления по критериям максимальной полезной мощности и термического КПД. Соответственно, разница существенно влияет на технико-экономические и эксплуатационные показатели проектируемого компрессора ГТУ.

Диссертация **соответствует** паспорту специальности 01.04.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника по формуле специальности и областям исследования.

Используемые **методы исследования**: методы математического анализа и статистики, химической и технической термодинамики.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивают соблюдение положений математического анализа и технической термодинамики при выводе

расчетных зависимостей, верификация результатов расчетов по известным (опубликованным) теоретическим и экспериментальным данным других авторов, использование известной библиотеки численных методов, качественное непротиворечие результатов с представлениями о процессах, протекающих в энергетических установках.

По работе имеются следующие **замечания**:

1. Одной из особенностей данной работы было то, что процессы сжатия и расширения было предложено разбить на участки, каждый из которых считать отдельно и потом складывать. На стр. 79 излагается мысль, что по участкам можно менять состав рабочего тела и его расход. Это может позволить более корректно считать влияние впрыска воды в проточную часть (на входе в компрессор или где то в процессе сжатия), отборы воздуха на охлаждение в процессе сжатия, отвод конденсата в процессе охлаждения и т.д. Однако в представленной работе отсутствует демонстрация всего этого.
2. Идет активное чередование терминов «изоэнтروпический», «изоэнтропный» и «адиабатный». Это не корректно, т.к. это разные условия протекания процессов (процесс может быть не адиабатным, но изоэнтропным или изоэнтропным, но не адиабатным).
3. В работе приведено некорректное утверждение: «Усложнение цикла газотурбинной установки охлаждением рабочего тела компрессора приводит к увеличению термического коэффициента полезного действия и полезной мощности цикла» (текст, стр. 9). Это может быть справедливо только в отдельных случаях: для регенеративных циклов ГТУ при высоких степенях регенерации; при передаче теплоты от воздуха, текущего по внутреннему контуру, к воздуху, текущему по внешнему контуру ТРДД; при очень низких КПД компрессоров; при изменении (увеличении) оптимальной степени повышения давления (данный вариант представлен в работе).
4. В работе принимаются допущения «отсутствие недоохлаждения воздуха в промежуточном охладителе по сравнению с температурой окружающей среды, не учитывается отвод воздуха на охлаждение турбины» (текст, стр. 36), хотя аналогичные результаты могут быть получены и без этих ограничений.
5. Утверждается, что «показатель адиабаты k является производной от c_p и z , а также газовой постоянной R » (текст, стр. 40), хотя с математической точки зрения он является величиной, зависящей (или определяемой) от этих параметров.

6. Из текста диссертации не ясно что такое «природный газ осредненного состава»?
7. При использовании аппроксимации использован подход с делением всей области на участки (220-290К, 290-1190 К и т.д.), однако не ясно какие требования наложены на границах участков (равенство значений, равенство первых производных, равенство вторых производных, все выше перечисленное)?
8. Не ясно для чего введено понятие минимума удельного расхода топлива (текст, стр. 97), ведь в данной постановке оно совпадает с максимумом термического КПД цикла.
9. В тексте работы присутствует три варианта написания формулы **полезной мощности**: $L_n = L_k - L_m$ (текст, стр. 97), $L_n = L_m - L_k$ (текст, стр. 109), $L_k = L_T - L_k$ (текст, стр. 112).
10. Неудачно выбраны наборы исходных данных для демонстрации применения модернизированной методики расчета. При уточнении полезной мощности и термического КПД эффект от использования предлагаемой автором модели, эффект слабый (не более 5% даже при режимах с низкими температурами и высокими давлениями).
11. В целом текст диссертации оформлен небрежно. Это подтверждается:
 - небрежностью использования стилей написания (например, заголовки параграфов 1.1, 1.2 и 1.3, 1.4 и 3.1, 3.2; межстрочный интервал основного текста; наличие абзацных отступов; написание русских индексов и т.д.);
 - небрежностью выполнения правил оформления (отделение дробной части от целой точкой или запятой; неполное написание формул; отсутствие подписи осей на графиках и неполное заполнение таблиц и т.д.);
 - наличием опечаток (см., например, стр. 52 «изоэнтропы», стр. 86 «поаышения» и т.д.).

Приведенные замечания носят не принципиальный характер, не влияют на основные результаты, полученные в данной работе, и не снижают ее высокой научной и практической значимости. Работа носит законченный характер. Полученные в ней результаты расчетов и выводы представляют несомненный практический интерес для учебного процесса и проектных организаций, занимающихся проектированием газотурбинных двигателей и энергетических установок. Результаты работы достаточно полно опубликованы в

профессиональных изданиях (в том числе из перечня ВАК) и представлены на профильных конференциях. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Заключение. С учетом изложенного считаю, что содержание диссертации Хасанова Наримана Гаязовича «Влияние неидеальности термодинамических свойств рабочих тел на процессы в ГТУ с промежуточным охлаждением воздуха» соответствует специальности 01.04.14 - «Теплофизика и теоретическая тепло-техника» по техническим наукам, работа соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней (утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842) предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент

кандидат технических наук, доцент кафедры «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Бурцев Сергей Алексеевич

06 июня 2018 г.

105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская улица, д. 5, стр. 1.

Рабочий телефон 8 (499) 265-78-42

E-mail: burtsev@bmstu.ru

В Е Р Н О:

ЗАМ НАЧАЛЬНИКА УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ

МГТУ ИМ Н Э БАУМАНА

А Г МАТВЕЕВ

