

РОДИОНОВА АНАСТАСИЯ МИХАЙЛОВНА

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДЯНОГО  
ПАРА С УЧЕТОМ МОЛЕКУЛЯРНО-КЛАСТЕРНОГО СОСТАВА**

6N0717 - Теплоэнергетика

Автореферат магистерской диссертации  
на соискание академической степени магистра технических наук по  
специальности «Теплоэнергетика»

Республика Казахстан  
Усть-Каменогорск  
2011

Работа выполнена в Восточно-Казахстанском государственном техническом университете им. Д. Серикбаева

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук Сегеда Т.А.

Официальный оппонент: доктор физико-математических наук, профессор Курлапов Л.И.

Защита состоится 20 июня 2011г. в 9-00 на заседании Диссертационного совета для защиты магистерских диссертаций при Восточно-Казахстанском государственном техническом университете им. Д. Серикбаева по адресу: 070004, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева 19, аудитория Г1-317

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева.

Автореферат разослан «20» мая 2011 г

Ученый секретарь  
Диссертационного совета

Сегеда Т.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования** обусловлена необходимостью развития и применения кластерной модели газового состояния вещества с использованием экспериментальных данных в конкретных теплоэнергетических процессах.

**Объектом исследования** является водяной пар с макропараметрами, соответствующими условиям осуществления цикла Ренкина на ТЭЦ.

**Предметом исследования** является расчет термодинамических параметров водяного пара на основе кластерной модели газа.

**Цель диссертационной работы** заключается в том, чтобы выявить кластерную составляющую и оценить ее влияние на термодинамические параметры водяного пара как рабочего тела, используемого при производстве энергии паротурбинной установкой (на примере ПТ 25-90-10).

### **Задачи исследования:**

- определение удельного объема (плотности) водяного пара по измеренным значениям давления и температуры в технологически важных точках цикла паротурбинной установки на ТЭЦ;
- определение концентраций кластеров водяного пара при известных измеренных значениях макропараметров;
- расчет давления водяного пара с учетом кластерного состава;
- расчет энтальпии водяного пара в перегретом состоянии на выходе из котла, в точках производственного и теплофикационного отборов, в конденсаторе с учетом кластерного состава.

**Метод исследования** – расчетно–теоретический на основе кинетической теории.

### **Новизна исследования:**

Впервые методика расчетов термодинамических параметров газового состояния вещества на основе кластерной модели применена к рабочему телу в реальном теплоэнергетическом процессе.

Установлено, что в технологически важных точках цикла паротурбинной установки на ТЭЦ присутствуют кластеры небольших размеров (до квадромеров).

Установлено, что влияние кластеров на термодинамические свойства водяного пара как рабочего тела определяется зависимостью кластерного состава от макропараметров (давление, температура).

### **Положения, выносимые на защиту:**

- термодинамические свойства рабочих тел в газовом состоянии могут определяться и прогнозироваться на основе кластерной модели;
- рабочее тело в газообразном состоянии (водяной пар) в реальных теплоэнергетических процессах представляет собой молекулярно-кластерную смесь;
- на термодинамические свойства водяного пара как молекулярно–кластерной смеси оказывает влияние изменение кластерного состава

вследствие распада и образования кластеров при изменениях макропараметров (давление, температура, плотность).

**Обоснованность и достоверность результатов работы** обеспечена тем, что для расчетов использованы стандартные вычислительные средства, и расчеты согласуются с имеющимися данными по тем параметрам, для которых они имеются.

**Теоретическая и практическая значимость исследования** состоит в том, что рабочие тела в газовом состоянии используются во многих технологических процессах, в энергетических устройствах, поэтому там может использоваться разработанная схема расчетов. Разработанные методики расчетов термодинамических свойств позволяют прогнозировать их в широкой области макропараметров рабочих тел для различных циклов теплоэнергетических процессов (например, в ядерных реакторах, в которых насыщенный водяной пар находится под давлением 12-60 атм и температуре до 330 °С). Выявленные особенности кластерного состава водяного пара могут служить основой для управления теплоэнергетическим процессом, осуществляемым в установках, работающих в режиме циклов. В частности, наличие кластеров в водяном паре при высоких параметрах обуславливает снижение КПД цикла.

#### **Апробация работы**

Основные положения и результаты докладывались на следующих научных конференциях: на X Республиканской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Творчество молодых – инновационному развитию Казахстана», 22-23 апреля 2010 г.; на XI Республиканской научно-технической конференции молодых ученых и студентов, посвященной 20-летию Независимости Республики Казахстан «Творчество молодых – инновационному развитию Казахстана», 21-22 апреля 2011 г.

**Личный вклад автора.** Аналитический обзор проблемы, определение исследуемой области, сбор и анализ экспериментальных данных, поиск методов решения поставленных задач, расчеты и оценка достоверности расчетов, анализ полученных результатов, формирование итоговых выводов.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 2 статьи:

1. Родионова А.М. Термодинамические параметры водяного пара как рабочего тела энергетики и кластерная модель//Материалы X Республиканской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Творчество молодых - инновационному развитию Казахстана». - Усть-Каменогорск, 2010 г. - с. 79-80;

2. Родионова А.М. Расчет термодинамических параметров водяного пара на основе кластерной модели газа//Материалы XI Республиканской научно-технической конференции молодых ученых и студентов, посвященной 20-летию Независимости Республики Казахстан «Творчество молодых – инновационному развитию Казахстана». - Усть-Каменогорск, 2011 г. - с 106-107.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка использованных источников. Основное

содержание работы изложено на 65 страницах машинописного текста, иллюстрированного рисунками и таблицами.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** даны обзор и анализ актуальности использования водяного пара в энергетике, приведены актуальные научные представления о кластерной природе газообразного состояния вещества [1], общая характеристика работы. Обоснована ее актуальность, сформулированы цели и задачи исследования, изложены положения, выносимые на защиту. Показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, обоснована их достоверность.

В **первом** разделе приведены обзор и анализ способов и методик определения термодинамических свойств водяного пара, приведены основные соотношения и алгоритмы для их определения с помощью справочников, диаграмм, численных способов, реализованных в виде программных комплексов. Введены основные представления о кластерах в газообразном состоянии вещества и необходимости учета их влияния на термодинамические свойства водяного пара как рабочего тела, претерпевающего изменения макропараметров в широком диапазоне давлений и температур. Приведены соотношения для расчетов концентрации кластеров в газах на основе экспоненциального распределения по размерам, показано их влияние на молярную массу водяного пара. В качестве первичного принципа в кластерной модели газов принимается распределение их по размерам в виде [2; 3]:

$$C_g^{(c)} = C_1^{(c)} \exp[-\beta(g-1)] , \quad (1)$$

где  $C_g^{(c)}$  - числовая доля  $g$  - мерных кластеров (кластеров, состоящих из молекул в количестве  $g$  штук),

$C_1^{(c)}$  - числовая доля мономеров (молекул), которые рассматриваются как кластеры размером 1,

$\beta$  - нормировочный множитель,

$g$  - размер кластера в числах входящих в него молекул.

Числовая доля играет роль концентрации кластерного субкомпонента, через нее выражаются аддитивные параметры кластерной смеси. Она вводится как доля по отношению к числовой плотности всех кластеров:

$$C_g^{(c)} \equiv \frac{n_g}{\sum_{g=1}^r n_g} \quad (2)$$

где  $n_g$  - числовая плотность  $g$ -мерных кластеров,

$\sum_{g=1}^r n_g = n^{(c)}$  - числовая плотность всех кластеров,

$r$  - размер наибольшего учитываемого в данной задаче кластера.

Через эту концентрацию выражается средняя молярная масса кластерной смеси:

$$\langle M \rangle = \sum_{g=1}^r C_g^{(c)} M_g, \quad (3)$$

где  $M_g$  - молярная масса  $g$ -мерных кластеров,

$\langle M \rangle$  - средняя молярная масса кластерной смеси.

В кластерной модели газообразного состояния вещества изменение числа молей кластерной смеси обуславливает проявление реальных свойств водяного пара. Концентрация кластеров зависит от значений макропараметров (температуры, плотности), образование или распад кластеров соответствует изменению числа структурных элементов, которые создают давление, являющимся одним из определяющих параметров эффективности рабочего цикла тепловых установок.

Во **втором** разделе приводится решение системы уравнений

$$C_1^{(c)} \left( 1 + \sum_{g=2}^r \exp[-\beta(g-1)] \right) - 1 = 0,$$

$$C_1^{(c)} \sum_{g=1}^r \{g \exp[-\beta(g-1)]\} - \frac{\rho RT}{pM_1(1-b)} = 0,$$

$$C_1^{(c)} \exp[-\beta(g-1)] - C_g^{(c)} = 0,$$

$$g = 1 \div r.$$

В этой системе учтен относительный собственный объем частиц, который выражается через эффективный диаметр столкновений по обычному правилу [4]:

$$b = \frac{2}{3} n^{(n)} \pi \sigma^3,$$

где  $\sigma$  - эффективный диаметр столкновений молекул, определялся из графика (рисунок 1).

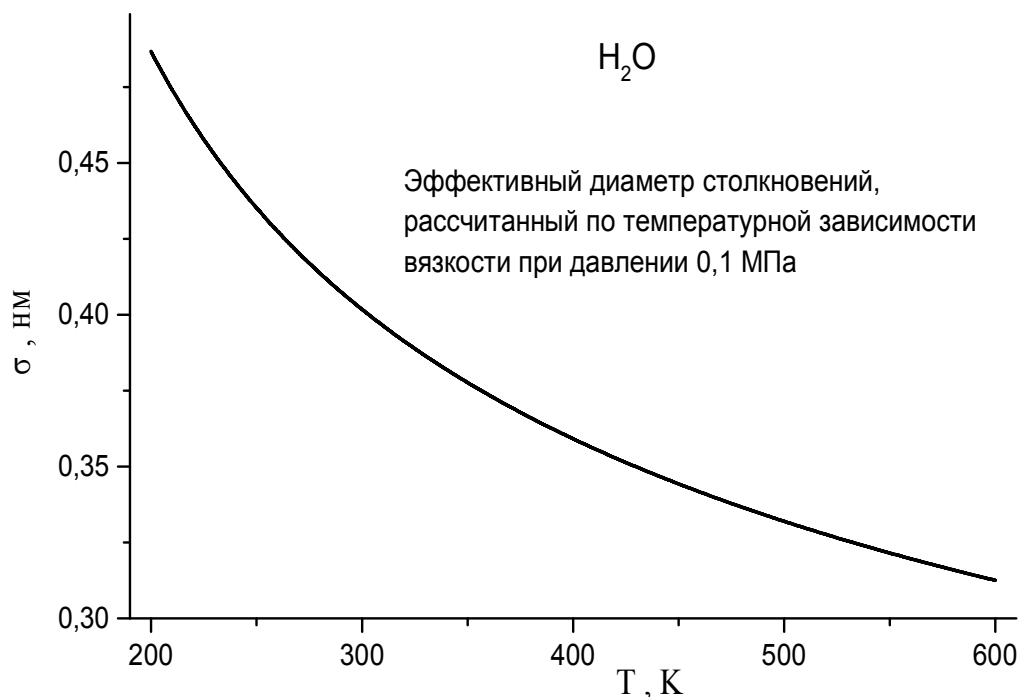


Рисунок 1 – Эффективный диаметр столкновений молекул водяного пара

Данные графика на рисунке 1 получены по вязкости разреженного газа (при атмосферном давлении), которые были аппроксимированы полиномом третьей степени, а эффективный диаметр был рассчитан по формуле кинетической теории разреженно газа (диаметр не зависит от давления).

Вышеприведенная система уравнений решалась для кластеров размером до пятимеров, т.к. предварительный анализ технологических параметров давления и температуры цикла Ренкина на ТЭЦ с паротурбинной установкой типа ПТ 25-90-10 показал, что учет кластеров более высокого порядка не имеет острой необходимости. В результате чего оказалось возможным решить систему уравнений для пятимеров аналитически, т.к. было получено линейное однородное уравнение четвертой степени.

Система уравнений была решена также и при помощи численного метода с использованием программного средства в среде Visual Basic.

В результате были получены значения нормировочного множителя  $\beta$  и определены концентрации мономеров, димеров, тримеров, квадromеров и пятимеров для измеренных значений давлений и температур водяного пара на выходе из котельного агрегата (перегретый пар), ступеней производственного отбора, регенерации пара, теплофикационного отбора и в конденсаторе. Анализ полученных результатов показал, что в конденсаторе пар находится в состоянии, характеризуемом как жидкость.

Расчетные данные представлены на рисунках 2-8.

Из графиков видно, что при рассмотренных параметрах давлений и температур в водяном паре, проходящем ступени турбины, и в

характеристических точках цикла Ренкина существуют преимущественно мономеры, димеры, тримеры и в очень небольших количествах квадромеры. Тем не менее, хорошо подтверждается экспоненциальное распределение кластеров по размерам при измеренных значениях давлений и температур. Таким образом, возможно применять методику расчета термодинамических свойств водяного пара на основе кластерной модели.

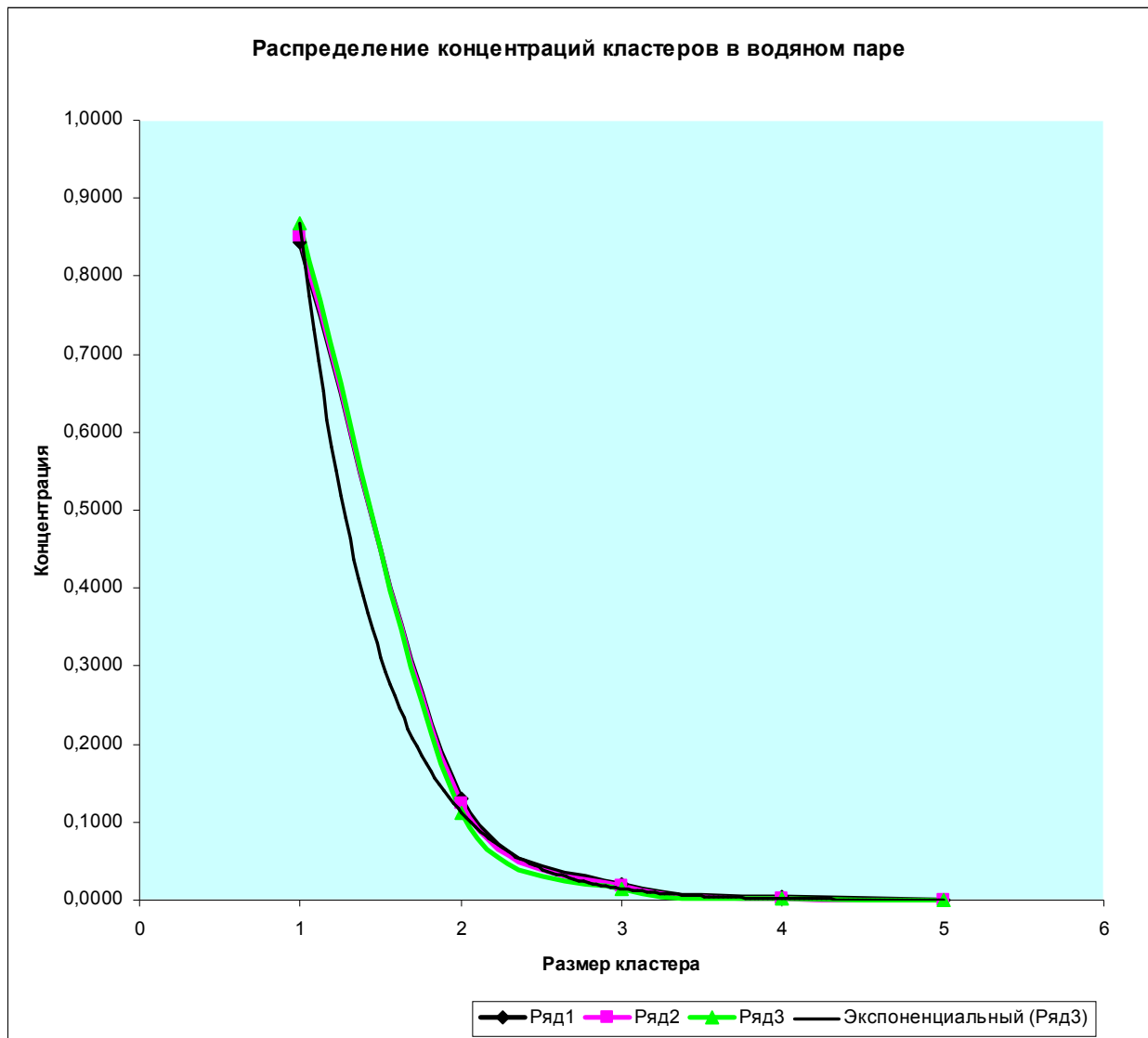


Рисунок 2 – Распределение концентраций кластеров в водяном паре при давлении  $P=8,92$  МПа, и температурах  $T_1=758$ К (ряд 1),  $T_2=798$  К (ряд 2),  $T_3=818$  К (ряд 3).



Рисунок 3 – Распределение концентраций кластеров в водяном паре при давлении  $P=9,02$  МПа, и температурах  $T_1=758$ К (ряд 1),  $T_2=798$  К (ряд 2),  $T_3=818$  К (ряд 3) – измеренные значения



Рисунок 4 – Распределение концентраций кластеров в водяном паре при давлении  $P=9,31$  МПа, и температурах  $T_1=758$ К (ряд 1),  $T_2=798$  К (ряд 2),  $T_3=818$  К (ряд 3)

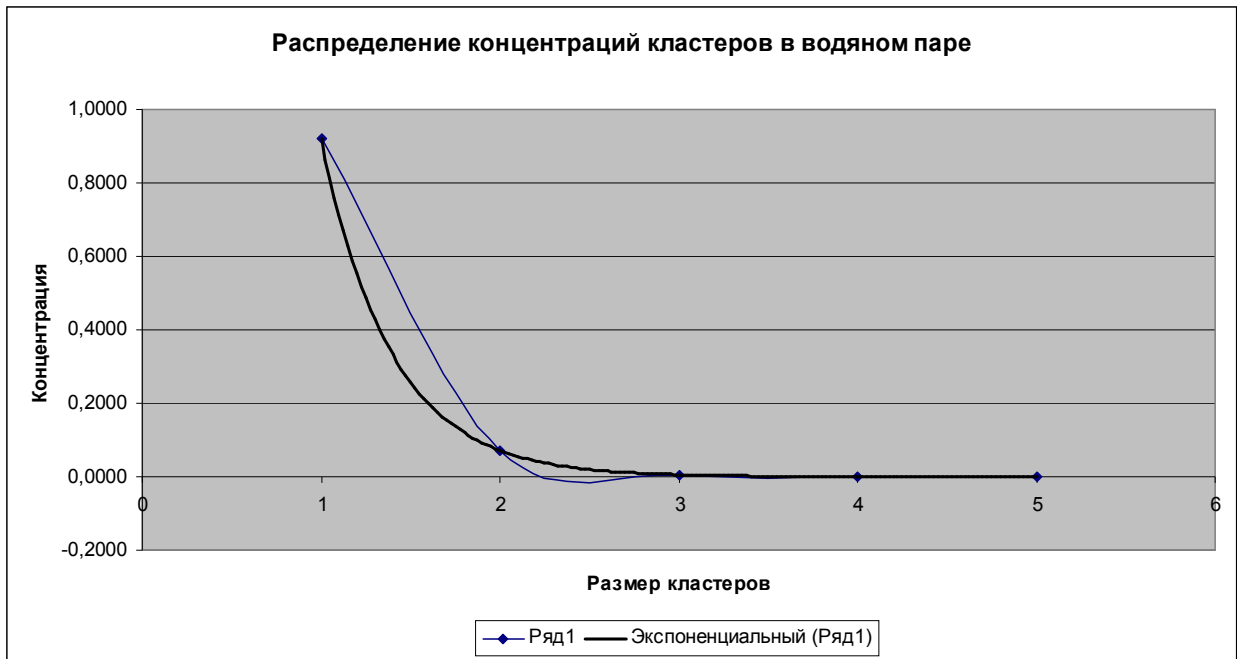


Рисунок 5 – Распределение концентраций кластеров в водяном паре при давлении  $P=3,92$  МПа, и температуре  $T=648$  К – измеренные значения



Рисунок 6 – Распределение концентраций кластеров в водяном паре при давлении  $P=1,11$  МПа, и температурах  $T_1=543$  К (ряд 1),  $T_2=563$  К (ряд 2),  $T_3=613$  К (ряд 3) – измеренные значения



Рисунок 7 – Распределение концентраций кластеров в водяном паре при давлении  $P=0,11$  МПа, и температуре  $T=398$  К - измеренные значения



Рисунок 8 – Распределение концентраций кластеров в водяном паре при давлении  $P=0,17$  МПа, и температуре  $T=398$  К

В **третьем** разделе на основе определенных концентраций кластеров приводится расчет фактора сжимаемости. Фактор сжимаемости кластерной смеси выражается через концентрации кластерных субкомпонентов:

$$z = \frac{1}{(1-b) \sum_{g=1}^r g C_g^{(c)}} . \quad (4)$$

Согласно расчетам в исследуемом диапазоне давлений и температур значения фактора сжимаемости варьируется в пределах от 0,8261 до 1,0430.

В дальнейшем по расчетному значению фактора сжимаемости рассчитывались значения давления по формуле:

$$p = zn^{(n)}kT , \quad (5)$$

где  $n^{(n)}$  - числовая плотность молекул в идеально-газовом состоянии.

Как показывают полученные результаты, учет кластерного состава через фактор сжимаемости приводит к удовлетворительной точности значений давления, полученных расчетным способом, в сравнении с измеренными (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнение рассчитанных значений давления с учетом кластерного состава с измеренными

Температура, К	Давление, Па, измеренное	Давление, Па, расчет
758	8921569,0	8864701,2
798	8921569,0	8693036,4
818	8921569,0	8764967,9
758	9019608,0	8961713,8
798	9019608,0	8863347,4
818	9019608,0	9105651,6
758	9313725,0	9424438,7
798	9313725,0	9448589,6
818	9313725,0	9296782,1
713	8823529,0	10208769,4
648	3921569,0	3976126,9
623	1745098,0	1759723,3
573	1343137,0	1328772,8

По полученным в результате расчета давлениям определялись значения энтальпии водяного пара в исследуемом диапазоне давлений и температур. Полученные расчетные значения сравнивались с табличными из справочника [5] (таблица 2).

Таблица 2 - Сравнение рассчитанных значений энтальпии водяного пара с учетом кластерного состава с данными из [5]

Энтальпия, Дж/кг, расчет	Энтальпия, Дж/кг, [5]
3448686,0	3465587
2725397,0	2726800
117382,5	117340
125748,8	125700

Оценка погрешности расчетов показала, что ошибка не превышает 0,5 %. Таким образом, кластерная модель оказалась применимой для определения термодинамических свойств водяного пара, что позволяет ее применять и для целей планирования, контроля и управления теплоэнергетическими процессами при производстве тепла и электроэнергии. В частности, обнаружение кластеров в виде димеров и тримеров на входе в турбину показывает одну из причин отклонения кпд реального процесса от максимально возможного для данной установки в сторону уменьшения, следовательно, необходимо в точке с самым высоким потенциалом перегретого пара подбирать оптимальные параметры давления и температуры, при которых наличие кластеров будет минимальным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты работы состоят в следующем:

- кластерная модель газообразного состояния вещества апробирована на исследовании и определении термодинамических свойств водяного пара в реальном теплоэнергетическом процессе;

- получено аналитическое решение системы уравнений для определения концентраций кластеров до пятимеров включительно;

- установлено, что водяной пар в исследуемом диапазоне давлений и температур, соответствующим технологическим параметрам работы паротурбинной установки типа ПТ 25-90-10 представляет собой молекулярно-кластерную смесь, состоящую из мономеров, димеров, тримеров и квадромеров;

- учет молекулярно-кластерного состава водяного пара адекватно описывает значения измеренных значений давлений и энтальпии, что позволяет применить кластерную модель газообразного состояния вещества для планирования, контроля и управления теплоэнергетическими процессами производства тепла и электроэнергии.

**Оценка полноты решений поставленных задач.** Поставленная цель работы достигнута, задачи исследования решены полностью. Результаты исследования доведены полностью до логического завершения в виде расчетных значений на основе аналитического решения системы уравнений для определения концентраций кластеров до пятимеров, получены значения

давления и энтальпии водяного пара для технологически важных точек по циклу Ренкина.

**Разработка рекомендаций по использованию результатов.** Полученные результаты в виде расчетных схем пригодны для использования в целях определения термодинамических свойств водяного пара при производстве тепло- и электроэнергии.

**Оценка технико-экономической эффективности внедрения.** Внедрение полученных результатов исследования на основе молекулярно-кластерной модели позволит определить пути оптимизации теплоэнергетического процесса с участием водяного пара.

**Оценка научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области.** Проведенный обзор литературы, результаты теоретического и прикладного исследования позволяют сделать вывод о том, что в диссертационной работе использованы положения, соответствующие современному уровню развития термодинамики и молекулярной теории в применении к теплоэнергетическим процессам и установкам.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Смирнов Б.М. Генерация кластерных пучков // УФН. – 2003. – Т. 173, № 6. - С. 609 - 648.
2. Курлапов Л.И., Дьяченко Е.А. Характеристики состава кластерного газа.- Алматы,2001. – 13 с. – Деп. в КазгосИНТИ, 21.03.2001, № 8871 - Ка01.
3. Курлапов Л.И. Кластерная модель газа // ЖТФ. - 2003. - Т. 73, вып. 2. - С. 51 - 55.
4. Ферцигер Дж., Капер Г. Математическая теория процессов переноса в газах. - М.: Мир, 1976. - 556 с.
5. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справочник. – М.: Энергоатомиздат. – 1984. – 80 с.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Родионова А.М. Термодинамические параметры водяного пара как рабочего тела энергетики и кластерная модель // Материалы X Республиканской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «творчество молодых - инновационному развитию Казахстана». - Усть-Каменогорск, 2010 г. - с. 79-80;
2. Родионова А.М. Расчет термодинамических параметров водяного пара на основе кластерной модели газа // Материалы XI Республиканской научно-технической конференции молодых ученых и студентов, посвященной 20-летию Независимости Республики Казахстан «Творчество молодых – инновационному развитию Казахстана». - Усть-Каменогорск, 2011 г. – часть 1 - с 106-107.

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность темы исследования** обусловлена необходимостью развития и применения кластерной модели газового состояния вещества с использованием экспериментальных данных в конкретных теплоэнергетических процессах.

**Ключевые слова:** молекула, кластер, молекулярно-кластерная смесь, паротурбинная установка, цикл Ренкина.

**Объектом исследования** является водяной пар с макропараметрами, соответствующими условиям осуществления цикла Ренкина на ТЭЦ.

**Предметом исследования** является расчет термодинамических параметров водяного пара на основе кластерной модели газа.

**Цель диссертационной работы** заключается в том, чтобы выявить кластерную составляющую и оценить ее влияние на термодинамические параметры водяного пара как рабочего тела, используемого при производстве энергии паротурбинной установкой (на примере ПТ 25-90-10).

**Метод исследования** – расчетно–теоретический на основе кинетической теории.

**Обоснованность и достоверность результатов работы** обеспечена тем, что для расчетов использованы стандартные вычислительные средства, и расчеты согласуются с имеющимися данными по тем параметрам, для которых они имеются.

**Теоретическая и практическая значимость исследования** состоит в том, что рабочие тела в газовом состоянии используются во многих технологических процессах, в энергетических устройствах, поэтому там может использоваться разработанная схема расчетов. Разработанные методики расчетов термодинамических свойств позволяют прогнозировать их в широкой области макропараметров рабочих тел для различных циклов теплоэнергетических процессов (например, в ядерных реакторах, в которых насыщенный водяной пар находится под давлением 12-60 атм и температуре до 330 °С). Выявленные особенности кластерного состава водяного пара могут служить основой для управления теплоэнергетическим процессом, осуществляемым в установках, работающих в режиме циклов. В частности, наличие кластеров в водяном паре при высоких параметрах обуславливает снижение КПД цикла.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка использованных источников. Основное содержание работы изложено на 65 страницах машинописного текста, иллюстрированного рисунками и таблицами.

## ABSTRACT

**The relevancy of the research issue** is conditioned by the need of development and application of cluster models of matter gaseousness using experimental evidence in specific thermal power processes.

**Key words:** molecule, cluster, molecular-cluster mixture, steam-turbine plant, Rankine cycle.

**The investigation is concerned with** water vapor with the macro parameters which conform to the conditions of Rankine cycle performance at a TPP.

**The subject of study** is the estimation of water vapor thermodynamic parameters on the basis of a cluster gas model.

**The objective of the thesis** lies in identifying a cluster constituent and estimate its influence on the water vapor thermodynamic parameters as a control agent used at energy generation by a steam-turbine plant (by the example of IIT 25-90-10).

**Research method:** calculation-theoretical, on the basis of kinetic theory.

**The feasibility and reliability** of the work output is provided by the use for calculation of conventional computational means, and the calculations are in keeping with the data available for those parameters, for which they are available.

**The theoretical and practical importance of research** lies in the fact that gaseous control agents are used in many technology processes and in energy devices, that is why is the developed pattern of calculation may be used there. The developed design procedures for thermodynamic properties allow to predict them in a wide area of control agent macro parameters for various thermal power process cycles (for example, in nuclear reactors, where saturated steam is kept under the pressure of 12-60 atm and temperature to 330 °C). The identified water vapor cluster composition characteristics may serve as a basis for control of the thermal power process carried out in installations that operate in a cycle mode. In particular, the presence of clusters in water vapor at high parameters determines the loss of cycle efficiency.

**The structure and size of the thesis.** The paper consists of an introduction, three sections, a conclusion, and the list of used sources. The main contents of the work are represented on 65 pages of typewritten text illustrated by drawings and tables.

## АҢДАТПА

**Зерттеу тақырыбының маңыздылығы** нақты жылуэнергетикалық үрдістерде тәжірибелік мәліметтерді қолдана отырып затқа кластерлік үлгідегі газдық күйді қолдану және жетілдіру қажеттілігіне негізделген.

**Түйінді сөздер:** молекула, кластер, молекулярлы-кластерлік қоспа, бу турбиналық қондырғы, Ренкин цикілі.

**Зерттеу аймағына** ЖЭЦ-да Ренкин циклін жүзеге асыру мақсаты үшін сәйкес келетін шарттар мен макроөлшемдер қосылған сулы бу жатады.

**Зерттеу пәніне** газдың кластерлік үлгісіне негізделген су буы өлшемдерінің термодинамикалық есебі жатады.

**Диссертациялық жұмыстың мақсаты** кластерлік құрамасын анықтауға және оның бу турбиналық қондырғының энергия өндірісі кезіндегі қолданылатын (ПТ 25-90-10 негізінде) оның жұмыс денесі ретінде су буының термодинамикалық өлшемдерінің әсерін бағалау.

**Зерттеу әдісі-** кинетикалық теория негізінде есептік теориялық

**Жұмыс қорытындысының шынайылығы мен ерекшелігі** үшін есептер жүргізу үшін стандартты есептеу құралдары қолданылған және есептер оларға арналған өлшемдерге сәйкес келеді.

**Зерттеудің теориялық және тәжірибелік мәні** газ күйіндегі жұмысшы дене техникалық үрдістерде, энергетикалық қондырғыларда қолданылуы. Сондықтан онда жетілдірілген есептеу үлгісі қолданылады.

Термодинамикалық қасиеттері бойынша жетілдірілген есептеулер әдістемелері жылуэнергетикалық процестердің әр-түрлі циклдері үшін кең аумақта жұмыс денесінің макроөлшемдерін болжауға мүмкіндік береді (мысалы ядерлік реактордағы қаныққан су буы 12-60 атм қысымда және 330 °С температурада болады)

Су буының кластерлік құрамындағы анықталған ерекшеліктер цикілдік режимде жұмыстайтын қондырғыларда орындалатын жылуэнергетикалық үрдістерді басқаруға негіз бола алады. Жалпы, жоғары өлшемдерде су буында кластерлердің болуы циклдің ПӘК төмендеуімен түсіндіріледі.

**Диссертацияның құрылымы мен көлемі** кіріспеден, үш бөлімнен, қорытындыдан, қолданылған әдебиеттер тізімінен тұрады. Жұмыстың негізгі мазмұны 65 беттік машинажазбалы мәтіннен, суреттер мен кестелерден тұрады.