

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук,

доцента **Угланова Дмитрия Александровича**

на диссертацию Карнаух Виктории Викторовны на тему «Развитие научных основ совершенствования процессов охлаждения оборотной воды и использования ее теплоты на предприятиях пищевых производств», представленную к защите на заседании диссертационного Совета Д 01.016.03 при ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 7 разделов, выводов, приложений и списка литературы из 345 источников. Диссертация изложена на 250 стр. основного текста, содержит 76 рисунков и 43 таблицы. Изложение диссертационной работы подчинено изложению поставленных задач.

### **Актуальность избранной темы исследования**

Современное развитие энергетики характеризуется значительным увеличением стоимости энергоносителей, а также ухудшением состояния окружающей среды и осложнением её охраны от действия теплогенерирующих установок. Энерго- и ресурсосбережение, а также охрана окружающей среды являются приоритетными направлениями развития фундаментальных исследований в области потребления топливно-энергетических ресурсов.

Развитие энергетики в условиях рыночной экономики сопровождается ужесточением требований к потерям при производстве и потреблении энергии, а также вредным выбросам в окружающую среду.

Большое значение политика энергосбережения имеет для предприятий по выработке пищевых продуктов. Объясняется это тем, что пищевая промышленность располагает значительным энергетическим потенциалом, являясь при этом крупным потребителем энергетических ресурсов.

К числу приоритетных направлений деятельности предприятий пищевой промышленности в области энергосбережения относятся: техническое перевооружение и модернизация производств на базе высокотехнологичных ресурсо- и энергосберегающих и экологически чистых технологий; повышение рентабельности, КПД компрессорных и котельных установок; использование вторичных ресурсов, в том числе горючих отходов производств.

Одной из характерных черт современного этапа научно-технического прогресса является возрастающий спрос на возобновляемые и вторичные источники энергии.

Несомненно, развитие и адаптация энергосберегающих технологий к современным реалиям требует научного обеспечения. И хотя вопросам внедрения технологий по утилизации вторичной теплоты на промышленных

объектах посвящено немало работ, они имеют узкую «локальную» направленность, ориентированную только на конкретное предприятие. С этой точки зрения, диссертационная работа Карнаух Виктории Викторовны на тему «Развитие научных основ совершенствования процессов охлаждения оборотной воды и использования ее теплоты на предприятиях пищевых производств», в которой предложен комплексный подход к утилизации теплоты охлаждающей воды технического водоснабжения предприятий пищевой промышленности, посвящена **актуальной проблематике** и представляет, как научный, так и практический интерес.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Основные положения диссертационной работы в достаточной мере обоснованы и логически вытекают из поставленной диссертантом целей.

Все научные и практические исследования, представленные в диссертации, прошли апробацию на многочисленных семинарах и международных конференциях. Также они в полной степени представлены в 40 научных работах, среди которых 20 в реферируемых периодических изданиях, включенных в перечень ВАК ДНР (2 статьи ВАК РФ, 15 статей ВАК ДНР и 3 статьи в изданиях, включенных в международную наукометрическую базу Scopus); 2 раздела в коллективных монографиях и 18 публикаций в других изданиях, включая материалы и тезисы международных научных конференций.

Таким образом, следует считать научные положения, выводы и рекомендации, полученные соискателем в ходе диссертационного исследования, в достаточной степени обоснованными.

### **Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций**

Достоверность полученных результатов определяется:

- использованием современных сертифицированных вычислительных и программных продуктов;
- получением расчетных результатов, основанных на фундаментальных уравнениях термодинамики и тепломассообмена;
- сравнением результатов исследования с известными результатами отечественных и зарубежных авторов и получением экспериментальных данных самим автором;
- проведением испытаний с применением апробированных методик и методов измерения, сертифицированного измерительного оборудования.

Имеются акты внедрения результатов научно-исследовательской работы на предприятиях пищевых производств: ООО ФИРМА «КОЛБИКО» и ООО «Донецкий комбинат замороженных продуктов» (г.Донецк), два акта об использовании результатов работы в профильных лабораториях

образовательных учреждений высшего образования (г. Самара и г. Донецк), что также подтверждает достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Впервые предложен научно-обоснованный метод, позволяющий при проектировании (эксплуатации) предприятий, использующих водяные конденсаторы и теплообменные аппараты, охлаждаемые оборотной водой, определять (прогнозировать) реальные количественные характеристики работы этих аппаратов при различных условиях, что позволит сформулировать точные требования к характеристикам водоохлаждающих устройств системы оборотного водоснабжения.

2. Получило дальнейшее развитие моделирование процессов совместного тепло-массообмена при испарительном охлаждении оборотной воды в градирне с подвижными насыпными насадками, что позволило установить зависимости по определению важнейших гидродинамических характеристик, необходимых для инженерных расчетов подобных водоохлаждающих аппаратов.

3. Получил дальнейшее развитие научно-методологический подход для расчета и прогнозирования работы ПТНУ, работающих на хладагентах четвертого поколения и использующих оборотную воду ППП как источник низкопотенциальной теплоты, на основе современных эколого-энергетических показателей.

4. Впервые при помощи метода нечетких множеств, основанного на многокритериальном подходе к выбору решения, разработана методика рационального выбора рабочих тел для энергопреобразующих систем, включая ПТНУ, использующих в качестве источника теплоту оборотной воды ППП, что будет способствовать разработке концептуальных низкотемпературных технологий преобразования энергии с учетом компромисса между энергоэффективностью, экологическими ограничениями и экономическими показателями.

5. Получили дальнейшее развитие подходы к оценке эффективности энергосберегающих проектов за счет разработки системы критериев для комплексной оценки полезного использования теплоты оборотной воды, а именно: степень нерезализованного потенциала энергосбережения, коэффициент энергетической эффективности способа утилизации теплоты, относительная стоимость сэкономленных энергоносителей, что позволяет выявить наиболее оптимальные схемные решения по энергосбережению.

6. Впервые предложены концептуальные положения по комбинированной утилизации оборотной воды на предприятиях пищевых производств, которые позволяют генерировать электроэнергию и обеспечивать нагрузки горячего водоснабжения, что позволит сформировать стратегические ориентиры модернизации теплового хозяйства предприятиях пищевых производств.

**Практическая значимость** работы заключается в разработке научно-обоснованных положений, которые могут быть применены как на стадии проектирования новых, так и при реконструкции существующих систем оборотного водоснабжения предприятий пищевых производств для решения таких технических задач, как:

- повышение надежности и эффективности работы водоохлаждающих устройств при переходе на градирни с использованием подвижных насыпных насадок за счет установления обоснованных в работе рациональных конструктивных и технологических параметров этих устройств;
- использование теплоты оборотной воды для теплоснабжения без повышения ее температурного потенциала за счет разработки соответствующих технических решений;
- использование теплоты оборотной воды для теплоснабжения при повышении ее температурного потенциала при помощи теплового насоса за счет рационального выбора используемых рабочих тел для типичных условий ППП и поддержания рациональных технологических параметров процессов;
- производство электроэнергии при утилизации теплоты оборотной воды в предложенной технологической схеме процесса с учетом поддержания установленных рациональных значений технологических и конструктивных параметров.

#### **Основное содержание работы**

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы; сформулированы цель и задачи исследования, определены объект, предмет, методы исследования; раскрыта научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов; отображены результаты апробации диссертации; представлена публикационная активность, структура и объем работы.

**В первом разделе** «Состояние научно-технической проблемы совершенствования тепломассообменных процессов и повышения уровня энергоэффективности в системах оборотного водоснабжения. Определение задач исследований» с учетом современных тенденций развития последовательно рассмотрены теоретические и практические аспекты вопросов совершенствования водоохлаждающих устройств.

Отмечается, что целесообразным является разработка универсального научного инструментария для исследования влияния температуры охлаждающей воды на эффективность работы теплотехнологического оборудования в условиях пищевых производств. Для подбора хладагента, отвечающего в полной мере экологическим, термодинамическим, эксплуатационным и экономическим критериям, необходимо развить научно-методологический подход с учетом современных эколого-энергетических показателей, базируясь на методе многокритериальной оптимизации. Показано,

что существует необходимость для комплексной оценки эффективности систем полезного использования теплоты оборотной воды и разработать систему критериев.

**Во втором разделе** «Влияние температуры охлаждающей воды на эффективность работы теплотехнологического оборудования в условиях пищевых производств» разработан научно-практический метод, позволяющий при проектировании (эксплуатации) предприятий, использующих водяные конденсаторы и теплообменные аппараты, охлаждаемые оборотной водой, определять (прогнозировать) реальные количественные характеристики работы этих аппаратов при различных условиях эксплуатации.

В разделе также отмечается, что сущность разработанного метода заключается в установлении зависимостей  $t_2'' = f(G_2, t_2')$ ,  $G_1 = f(G_2, t_2')$ , определяющих влияние начального значения температуры охлаждающей воды и ее расхода на температуру охлаждающей воды на выходе из аппарата и производительность аппарата по сконденсированному пару рабочего тела.

Также на распространенном примере горизонтального кожухотрубчатого конденсатора аммиачной холодильной машины показано, как при помощи разработанного научно-практического инструментария разрабатывается цифровой двойник любого типа конденсатора холодильной машины, охлаждаемого оборотной водой, с помощью которого можно определять реальные количественные характеристики работы соответствующих аппаратов.

**В третьем разделе** работы «Обоснование теории тепло-массообменных процессов в водоохлаждающих устройствах с подвижными насадками» экспериментально рассмотрена специфика контактирующих потоков и состояние псевдооживленного слоя в водоохлаждающих аппаратах с подвижной насадкой.

Выведены расчетные зависимости, позволяющие определить основные параметры структурных характеристик контактирующих сред. Получены и проанализированы экспериментальные данные в области гидродинамики и тепломассообмена для новых типов насадочных устройств при испарительном охлаждении воды.

Выполненные в разделе исследования показали, что:  
- эффективность процесса охлаждения оборотной воды в градирне значительно зависит от структуры потока жидкой и газовой фаз.

Важнейшими гидродинамическими характеристиками градирен с подвижной насыпной насадкой, необходимыми для инженерного расчета, являются критические скорости ( $\omega_0'$ ,  $\omega_1$ ), расход напора в рабочей зоне ( $\Delta p$ ), задержка жидкости ( $H_{ж}$ ) и динамическая высота слоя ( $H_{д}$ ).

Установлено, что для аппаратов с подвижной насыпной насадкой, используемых на предприятиях пищевых производств, предпочтительным для

реализации массообменных процессов представляется диапазон  $\rho_{эн} = 200...700 \text{ кг/м}^3$  и скорость  $\omega_r$  до 6 м/с, что соответствует приемлемыми значениями уноса жидкости  $\Delta G_{ж}$  и сравнительно небольшой динамической высотой слоя  $H_d$ . В работе предложены зависимости для определения критической скорости ( $\omega_0', \omega_1$ ), расхода напора в рабочей зоне ( $\Delta p$ ), задержки жидкости ( $H_{ж}$ ) и динамической высоты слоя ( $H_d$ ) в аппаратах с подвижной насыпной насадкой сферической формы.

**В четвертом разделе** «Синтез систем использования теплоты оборотной воды без повышения ее температурного уровня» проанализированы возможности использования теплоты воды в цикле оборотного водоснабжения без повышения ее температурного уровня для теплоснабжения и предложены конкретные схемные решения.

В данном разделе обосновано, что для отопления, вентиляции и горячего водоснабжения могут быть использованы стандартные аппаратные и технологические решения путем их использования по предложенной в диссертации схеме, а именно:

- для задач отопления в наибольшей мере подходит технология «теплый пол» при запитке нагревательных элементов напрямую оборотной водой, идущей на охлаждение, и реализации количественного регулирования;

- для горячего водоснабжения целесообразно использование двухступенчатой системы нагрева таким образом, чтобы в теплообменнике первой ступени в качестве греющего теплоносителя выступала не вода, отработавшая в отопительных приборах, а идущая на охлаждения оборотная вода;

- при решении задач вентиляции возможно обеспечение полного нагрева вентиляционного воздуха путем создания калорифера с поверхностью теплообмена в несколько раз превышающей эту величину для стандартного калорифера.

Также обоснована возможность прямого использования теплоты оборотной воды для реализации воздушного отопления зданий при помощи фанкойлов.

**В пятом разделе** «Моделирование систем использования теплоты оборотной воды на базе парокомпрессионных теплонасосных установок» рассмотрены теоретические и действительные циклы парокомпрессионных теплонасосных установок (ПТНУ), работающих на хладагентах четвертого поколения и использующих оборотную воду предприятий пищевых производств как низкопотенциальный источник; развит научно-методологический подход для расчета и прогнозирования работы ПТНУ на основе современных экологоэнергетических показателей.

Использованы природные хладагенты и хладагенты четвертого поколения по классификации ASHRAE, а именно: R600a, R744, R1234ze и R1336mzz (E).

Проведенные исследования в данной главе позволили сделать следующие выводы:

1. Алгоритм расчета и прогнозирования работы парокомпрессионных теплонасосных установок по утилизации теплоты оборотной воды предприятий пищевых производств, дополненный современными эколого-энергетическими показателями, может быть использован для исследования любых низкотемпературных парокомпрессионных систем, независимо от рода рабочей смеси и схемно-цикловых решений.

2. Предложенная методика оценки и выбора хладагента, основанная на методе многокритериальной оптимизации, является удобным инструментом при комплексной оценке работы систем кондиционирования и теплонасосных установок.

3. Для работы ПТНУ для обеспечения горячего водоснабжения изменение температуры низкопотенциального источника в пределах 20...40 °С не оказывает существенного влияния на величину теплопроизводительности  $q_{тн}$ .

4. Для исследуемых диапазонов НТИ и ВТИ, не являющихся характерными для ТНУ, согласно расчетам получена типичная картина поведения коэффициента преобразования теплоты  $\mu_{тн}$ , эксергетического КПД  $\eta_c$  и экологического коэффициента преобразования  $ECOP$ .

5. Распределение потерь эксергии по элементам насоса для исследуемых хладагентов при  $t_{и} = 20$  °С и  $t_{кд} = 60$  °С позволяет выделить компрессор и конденсатор как элементы с наибольшими потерями, первопричиной можно считать неконтролируемый теплообмен от рабочего тела с высокой температурой через стенки к окружающему воздуху.

6. В теоретических циклах на компрессор и конденсатор приходится в среднем 30% всех потерь, а на в действительном – 45 % и 22 %, соответственно. То есть, именно эти узлы необходимо усовершенствовать, чтобы повысить эффективность работы установок. Как для природных хладагентов, так и для хладагентов четвертого поколения наименьший «вклад» в потери эксергии приходится на регенеративный теплообменник (эффективность составила  $\eta_{PTO_c} = 88...93\%$  – для теоретических циклов и  $\eta_{PTO_c} = 90...94\%$  – для действительных циклов).

7. При повышении температуры кипения хладагента на каждые 5 градусов повышение коэффициента теплотрасформации  $\mu_{тн}$  составило: для R600a – 13...29%; для R1234ze – 11...36%; R1336mzz – 8...34%; R744 – 7...22%. Наибольшее абсолютное значение коэффициента теплотрансформации установлено для R600a, а наименьшие абсолютные значения для каждой принятой температуры кипения – для R744.

8. Для целей теплоснабжения и горячего водоснабжения для работы среднетемпературных ПТНУ по утилизации теплоты оборотной воды предприятий пищевых производств с исходно низкой температурой в качестве рабочего тела целесообразно рассматривать R600a и R1234ze.

9. Финальный выбор хладагента и схемы работы ПТНУ должен базироваться на предложенном экономическом анализе проекта с учетом лучших термодинамических и экологических характеристик рабочего тела.

**В шестом разделе** «Обоснование возможности и целесообразности использования теплоты оборотной воды для электрогенерации» приведена оценка эффективности использования вторичной теплоты на предприятиях пищевой промышленности при ее утилизации и трансформации в электроэнергию посредством паротурбинной установки (ПТУ) замкнутого цикла.

На основании термодинамического цикла и теплового расчета паротурбинной установки установлено, что полный КПД электрогенерации данного комплекса при заданных параметрах составляет 3...4 %. Несмотря на довольно низкий показатель, полученная электроэнергия является экологически чистой.

Важным моментом является, что при практическом использовании новых рабочих тел, о которых имеется ограниченная информация о термодинамическом поведении, предложено применение метода искусственных нейронных сетей (подход ИНС) для прогнозирования энергоэффективности цикла Ренкина.

**В седьмом разделе** «Технико-экономическая оценка предложенных решений по использованию теплоты оборотной воды на предприятиях пищевых производств» с учетом интересов экономической и экологической политики потребителей оборотной воды разработан ряд критериев и интегральных показателей для анализа эффективности использования теплоты охлаждающей воды в оборотных циклах водоснабжения.

**Диссертация и автореферат** изложены доступным технически грамотным языком. Использован большой объем научной литературы по рассматриваемой проблеме. Содержание диссертации достаточно полно, подробно и ясно раскрывает постановку, методы и результаты решения поставленных задач. Оформление диссертации и автореферата соответствует установленным требованиям.

#### **Замечания по работе**

Недостатков, ставящих под сомнение справедливость каких-либо результатов, в диссертации не обнаружено. Однако имеются некоторые замечания:

1. Во втором разделе автором утверждается, что обнаружена зависимость: увеличение температуры воды на входе при прочих равных условиях приводит к некоторому снижению температуры воды на выходе (рис. 2.6 стр. 98) при условии одинакового расхода и температуры конденсируемого пара. Считаю,



что объяснение того, что это достигается за счет увеличения температурного напора недостаточно, увеличение напора не может компенсировать увеличение потребной тепловой мощности, которая линейно зависит от температуры на выходе. Данное утверждение следовало раскрыть более подробно.

2. В третьем разделе в п. «Исследование структуры контактирующих потоков и характер движения жидкости в аппаратах с подвижной насадкой» приведен ряд зависимостей, однако из текста непонятно, формулы (3.11)-(3.15) получены автором самостоятельно или представляют собой развитие теории теплопереноса в трехфазной системе?

3. Для уравнений (3.19) и (3.37) необходимо указать границы применимости.

4. Непонятно, чем вызваны нестандартные обозначения отопительных коэффициентов и КПД по тексту диссертации и автореферата.

5. Считаю не корректным термин «Органический цикл Ренкина». В классических учебниках, например, у авторов Нащокина В.В. и у Крутова В.И. в учебниках по теплотехнике используется термин «цикл Ренкина».

6. В шестом разделе рассматривается установка, работающая на органическом цикле Ренкина с КПД 3-4 %. При этом указывается, что полученная энергия является экологически чистой. Для данной установки необходимо также провести экономический анализ, потому что она является технологически сложной, следовательно, возникает вопрос о целесообразности создания установки с такой низкой эффективностью.

#### **Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным положением о порядке присуждения ученых степеней**

Сделанные замечания не влияют на общую позитивную оценку новых научных результатов, полученных автором диссертационного исследования.

Диссертационная работа Карнаух Виктории Викторовны на тему «Развитие научных основ совершенствования процессов охлаждения оборотной воды и использования ее теплоты на предприятиях пищевых производств» представляет законченное научное исследование, которое направлено на решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение.

Представленную диссертацию можно признать самостоятельной и завершенной работой. Тематика представленных в диссертационной работе научных исследований и полученных результатов в полной мере соответствует паспорту научной специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика. Автореферат диссертации соответствует содержанию работы и адекватно отражает ее основные научные положения. Оформление и содержание диссертации и автореферата также удовлетворяют требованиям ВАК.

В целом по актуальности, научной новизне, объему материалов, научной ценности теоретических и экспериментальных исследований, а также практическому значению полученных результатов, выполненная работа

отвечает требованиям п. 2.1 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор - Карнаух Виктория Викторовна, заслуживает присуждения ей ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика.

Официальный оппонент

доктор технических наук, доцент,  
доцент кафедры теплотехники и  
тепловых двигателей Федерального  
государственного автономного  
образовательного учреждения  
высшего образования «Самарский  
национальный университет имени  
академика С.П. Королева»  
(Самарский университет)

Угланов Дмитрий Александрович

Я, Угланов Дмитрий Александрович, согласен на автоматизированную обработку персональных данных, представленных в этом документе.

(подпись)

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный университет имени академика С.П.Королева» (Самарский университет)

Адрес: Российская Федерация, ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086

Тел.: (канцелярия): 8 (846) 267-43-70

Эд. почта: [ssau@ssau.ru](mailto:ssau@ssau.ru)

Адрес сайта: <https://ssau.ru>

