ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Салума Амера ***"Характеристики работы водяного теплового насоса в условиях образования льда на поверхности трубки испарителя"***, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика.

Одним из возможных решений проблемы теплоснабжения удаленных объектах теплопотребления с относительно невысокой плотностью населения является реализация эффективных локальных систем отопления на базе теплонасосных установок (*ТНУ*). Наиболее рациональным и экономически оправданным для условий российского климата является тип тепловых насосов, использующих тепловую энергию открытых водных источников, широко распространенных на территории страны. Температура воды в водоемах даже в зимний период подо льдом, как правило, не опускается ниже 275К. Однако закономерности работы теплового насоса в климатических условиях Российской Федерации изучены недостаточно. Для выработки рекомендаций по использованию ТНУ необходимо установить основные закономерности процессов кристаллизации воды и таяния льда на поверхностях трубок испарителя в процессе эксплуатации теплового насоса при относительно низких температурах воды в источнике, исследовать характеристики теплообмена при изменении толщины льда на поверхностях трубок испарителя. С фундаментальной точки зрения данная работа представляет интерес в связи с изучением процесса теплообмена в условиях термогравитационной конвекции, осложненной фазовыми переходами.

Таким образом, тема диссертационной работы Салума Амера является важной и **актуальной, как с практической**, так и с **фундаментальной** точки зрения.

Объектом исследования является парокомпрессионный тепловой насос, работающий в условиях образования слоя льда на рабочих поверхностях трубок испарителя, использующих воду в качестве низкопотенциального источника энергии.

Целью диссертационной работы Салума Амера является исследование характеристик работы теплового насоса в условиях образования и таяния льда на поверхности трубок испарителя и анализ эффективности работы *ТНУ* при изменении интенсивности теплообмена в результате образования льда на поверхности трубки испарителя. Автор впервые исследовал условия эксплуатации теплонасосной установки

в непроточных водоемах в условиях низких температур и установил основные закономерности процессов образования и таяния льда.

Для достижения поставленной цели автором было проведено экспериментальное исследование процессов образования и таяния льда на рабочих поверхностях трубок испарителя *ТНУ*, погруженных в воду с температурой 280 - 286 К, установление временных характеристик процессов кристаллизации воды и плавления льда в испарителе, изучение характеристик теплообмена между низкопотенциальным источником теплоты и хладагентом в трубке испарителя при образовании слоя льда на поверхностях трубки в условиях термогравитационной конвекции воды, определение минимальной длины трубки испарителя, необходимой для испарения фреона в условиях кристаллизации воды на части её внешней поверхности, математическое моделирование процесса теплообмена в области трубки испарителя водяного теплового насоса, разработка рекомендаций по повышению эффективности работы водяного теплового насоса.

Диссертационная работа Салума Амера изложена на 163 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 161 наименований, содержит 54 рисунков и 12 таблиц.

Во введении автор обосновывает актуальность работы, формулирует цель и задачи исследования, научную новизну и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены возможности применения тепловых насосов в современной практике. Представлены способы использования возможных источников теплоты для *ТНУ*; проанализированы перспективы применения непроточной воды как низкопотенциального энергетического ресурса; показаны и обоснованы нерешенные задачи, а также недостатки в работе теплонасосной установки «вода-вода» при образовании льда на поверхности трубки испарителя. На основе анализа литературных источников сформулированы основные задачи, требующие рассмотрения.

Во второй главе описана схема лабораторной установки и результаты экспериментальных исследований влияния начальной температуры воды вблизи поверхности трубок испарителя на режимы работы теплового насоса. Рассмотрено два источника низкопотенциальной теплоты: пресная вода и солевой водный раствор. Проведено сравнение эффективности работы насоса при использовании этих источников. Построены временные зависимости температуры поверхности трубок испарителя и конденсатора, а также воды вблизи их поверхности при различных начальных значениях температуры. Исследовано влияние процессов образования льда

на поверхности трубки испарителя на эффективность работы теплового насоса. Определен коэффициент преобразования теплоты ТНУ при низких температурах воды.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований влияния течения вблизи трубки испарителя в результате термогравитационной конвекции на процесс образования льда на поверхности трубки. Установлено, что при температурах воды ниже 277К естественная конвекция уменьшает скорость образования льда на стенке трубок, которые расположены глубже (на расстоянии около 10 см) от поверхности водного источника.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований влияния начальной температуры воды вблизи трубки конденсатора на процесс образования льда на поверхности трубки испарителя. Исследован процесс нагрева воды при работе конденсатора ТНУ для различных значений температуры воды в контуре обогрева.

В пятой главе представлены результаты математического моделирования теплообмена между трубкой испарителя и водой в условиях термогравитационной конвекции и фазового перехода на поверхности трубки; разработана двумерная математическая модель теплопереноса; решена система нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных (уравнения сохранения массы, импульса и энергии) в среде *COMSOL* методом конечных элементов; рассчитаны поля температур при разном положении трубок испарителя, определена толщина слоя льда; построены поля скоростей и линий тока в различные моменты времени. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов исследования.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Результаты исследований, представленные в рецензируемой диссертации, можно квалифицировать как законченное **решение имеющей важное значение для теории и практики задачи** энергосбережения при использовании теплонасосной установки типа «вода-вода».

Наиболее значимые и обладающие научной новизной результаты диссертации:

1. Экспериментальным путем определены значения температуры поверхности испарителя, и конденсатора, установлена толщина слоя льда на поверхности трубки испарителя, определены условия и время образования и таяния льда.
2. Выявлено влияние процессов образования льда на эффективность работы теплового насоса.

3. Получены данные о влиянии термогравитационной конвекции, возникающей вследствие разности температур различных слоев воды в водоеме при работе теплового насоса, на временные характеристики процессов кристаллизации воды и таяния льда на поверхности трубки испарителя, погруженного в водный источник низкопотенциального тепла.
4. Представлен алгоритм расчета длины трубки испарителя теплового насоса, необходимой для полного испарения фреона с учетом формирования слоя льда на внешней поверхности трубки испарителя.
5. Определены минимальные размеры длины трубки испарителя, достаточные для работы теплового насоса при определённой толщине льда на части рабочей поверхности испарителя.

Значение для науки и практики диссертационной работы Салума Амера заключается в том, что впервые установлены условия и характеристики эксплуатации теплового насоса при образовании льда на поверхности испарителя, погруженного в водоем с непроточной водой при низкой температуре. Выявлена зависимость параметров ТНУ от температуры воды, как источника низкопотенциальной теплоты. Использование подхода, разработанного автором диссертацтии позволяет обеспечить условия оценки эффективности использования водяного теплового насоса для нагрева воды.

В целом, полученные результаты создают основу для изучения процессов образования и таяния льда при работе водяного теплового насоса и оценки эффективности его ксплуатации.

Достоверность результатов экспериментов обусловлена оценками систематических и случайных погрешностей измерений. Каждый опыт повторялся три раза в идентичных условиях. Для измерения температур в разных узлах теплонасосной установки использовались хромель-алюмелевые термопары, подключенные к аналого-цифровому преобразователю, их сигналы передавались на персональный компьютер через адаптер сети, где расшифровывались и регистрировались в программе, разработанной в среде *LABVIEW*. Измерительные приборы проверялись и регулировались с использованием водно-ледяной смеси, имеющей температуру 273 К.

Материалы диссертации изложены с использование убедительных доказательств, в соответствии с правилами научного стиля и логично обоснованными основными результатами работы. Информированность и эрудиция автора подтвержается наличием в работе достаточно большого количества цитируемых источников.

По теме диссертационного исследования **опубликовано** 7 научных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых изданиях, включенных в Перечень ВАК, 2 из них в

научном журнале, индексируемом в базах данных Web of Science и Scopus). Результаты научных исследований были представлены на авторитетных международных и всероссийских научных конференциях.

Содержание автореферата **соответствует** основным положением диссертации.

Следует отметить, что наряду с достоинствами рецензируемая работа имеет следующие **замечания**:

1. При проведении экспериментальных исследований не проведено изучение динамики движения воды в результате термогравитационной конвекции, отсутствуют экспериментальные данные о характеристиках течения и скорости.
2. Расчеты мощности конденсатора при использовании экспериментальных измерений температуры воды проводились без учета теплопотерь.
3. При математическом моделировании автору следовало бы обосновать выбор размеров расчетной области и использование граничных условий непротекания/прилипания для потока воды и адиабатичности для температуры. Возникает вопрос, что изменится при изменении размеров расчетной области и типа граничных условий.
4. Расчеты выполнены для однородного распределения температуры в окрестности трубок испарителя. Однако в тексте диссертации отмечается, что температура воды в водоемах изменяется с глубиной. При этом характер этого изменения существенно зависит от времени года. Каким образом неоднородность температуры воды может повлиять на полученные результаты?
5. Экспериментальные исследования выполнены как для пресной, так и для соленой воды. Однако математическое моделирование выполнено только для пресной воды. Было бы целесообразно представить данные и для водоемов с соленой водой.
6. Количество ссылок на использованные литературные источники, приведенное во введении (140) не соответствует их фактическому значению (161).

Несмотря на эти замечания, диссертационная работа Салума Амера обладает научной новизной, имеет практическую направленность и может быть использована для рассмотрения эффективности работы водяной теплонасосной установки. Полученные автором результаты достоверны, а положения и выводы экспериментально обоснованы. Основные результаты опубликованы в научных и научно-технических изданиях и представлены на конференциях и семинарах.

Заключение. Диссертация Салума Амера в которой на основании выполненных автором исследований содержатся основные характеристики теплопереноса в условиях образования льда на поверхности трубок испарителя ТНУ (в зависимости от времени, температур поверхности трубок испарителя, конденсатора и теплоносителя, толщины слоя льда) **соответствует** паспорту специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика.

Диссертация выполнена соискателем самостоятельно на высоком научном уровне, базируется на достаточном количестве исходных данных, имеет внутреннее

единство, **является завершенной научно-квалификационной работой,** в которой на основании выполненных автором исследований содержится решение актуальной для отечественной теплоэнергетики задачи: научно-практическое использование водяного теплового насоса в условиях образования льда.

Диссертационная работа Салума Амера ***"Характеристики работы водяного теплового насоса в условиях образования льда на поверхности трубки испарителя"*** Соответствует требованиям п. 8 и 9 Порядка присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете, а её автор Салум Амер заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика.

Официальный оппонент:

Профессор кафедры теоретической механики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Томский государственный архитектурно-строительный университет", д.ф.-м.н. Матвиенко Олег Викторович

10.05.2019

Адрес: 634003, г. Томск, пл. Соляная, д.2

Тел. +79832382150, e-mail: matvolegv@mail.ru

Я, Матвиенко Олег Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой Салума Амера.

Подпись Матвиенко Олег Викторович удостоверяю.

Проректор по научной работе ТГАСУ Елугачев П. А.