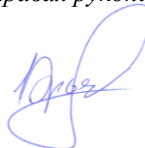


ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
«Донбасский государственный технический институт»

На правах рукописи

Юрьев Сергей Александрович



**ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА РАДИАЛЬНЫМИ ПОТОКАМИ
ФЛЮИДОВ В МАШИНАХ С ЦИЛИНДРАМИ ВРАЩЕНИЯ**

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы
(по отраслям)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ллчевск – 2020

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего образования ЛНР «Донбасский государственный технический институт»

Научный руководитель: **Карпук Игорь Анатольевич**

кандидат технических наук, доцент,
государственное образовательное учреждение высшего образования ЛНР «Донбасский государственный технический институт», доцент кафедры автоматизированных электромеханических систем им. Зеленова А.Б.

Официальные оппоненты: **Паламарчук Николай Владимирович**

доктор технических наук, профессор,
государственная образовательная организация высшего профессионального образования «Донецкий институт железнодорожного транспорта», заведующий кафедрой подвижного состава железных дорог

Кухарев Алексей Леонидович

кандидат технических наук, доцент,
государственное образовательное учреждение высшего образования «Луганский государственный университет имени Владимира Даля» Стахановский инженерно-педагогический институт менеджмента, доцент кафедры электро-механики и транспортных систем

Ведущая организация: государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет»

Защита состоится «18» декабря 2020 г. в 13⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 001.007.01 на базе ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ» по адресу: г. Алчевск, пр. Ленина, 16 (главный корпус), конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ» в читальном зале по адресу: г. Алчевск, ул. Ленинградская 45-а, библиотека.

Автореферат разослан « ____ » _____ 20__ года

Ученый секретарь
диссертационного
совета



кандидат технических наук,
доцент
Смекалин Евгений Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Исследование гидродинамики и теплообмена во вращающихся системах способствует совершенствованию конструкций существующих технических устройств и созданию новых, в которых осуществляется теплообмен вблизи вращающихся цилиндрических тел. Это обусловлено тем, что вращение цилиндрических тел в потоках флюидов – в жидких (вода, масло и др.) или газообразных (воздух, азот, аргон и др.) средах, очень часто сопровождает работу таких технических систем как: турбокомпрессорные установки различного назначения, насосы и вентиляторы; электродвигатели и генераторы.

Очень часто надежность механических систем определяется надёжностью их исполнительных элементов – электрических двигателей и машин. Надежность изоляции электрической машины в значительной степени определяет ее общую надежность. Перегрузки, в процессе эксплуатации электрической машины сопровождаются повышением температуры обмотки. Периодические, хотя бы и кратковременные, перегрузки могут привести к существенному снижению срока службы изоляции обмоток. Доля отказов из-за повреждения обмоток для асинхронных двигателей мощностью более 5 кВт составляет 85-95%, при этом около 50% отказов вызывается эксплуатационными причинами, которые в большинстве случаев приводят к перегреву обмоток. Убытки от выхода из строя обмоток могут составлять до 80% от стоимости годового выпуска электрических машин.

Повышение надежности машин, прежде всего, связано с разработкой научных основ проектирования и принятием соответствующих мер по совершенствованию методов конструирования, производства и эксплуатации. Одно из основных направлений повышения надежности машин – улучшение теплового состояния машины путем выравнивания температуры отдельных частей машины за счет разработки усовершенствованных систем охлаждения.

Совершенствование систем охлаждения механических систем с цилиндрами вращения требует изучения специфических течений сплошных сред, которые являются разновидностью вихревых и закрученных потоков. В закрученных потоках жидкостей и газов существенно интенсифицируются процессы обмена импульсом, теплотой и массой.

Степень разработанности проблемы исследования. Значительный вклад в изучение интенсификации теплоотдачи с поверхности гладкого непроницаемого цилиндра внесли: за счет увеличения скорости вращения цилиндра – I.S. Bjorclund, S.R.M. Gardiner, F. Tachibana,

Б.П. Устименко, А.А. Халатов; за счет вынужденного осевого течения – М. Bouafia, S. Chang, P.R.N. Childs, M. Fenot, Y. Lee, R.M. Lueptow, F. Tachibana; за счет рельефной структуры на поверхности вращающегося цилиндра – А.И. Борисенко, С. Gazley, D. Liu, J. Pêcheux.

Однако остаются недостаточно изученными вопросы влияния наложенного вынужденного радиального течения на теплоотдачу с поверхности вращающегося цилиндра.

Объект исследования – процессы теплообмена поверхности вращающегося ротора машин с радиальными потоками флюидов.

Предмет исследования – параметры радиального потока флюида при охлаждении вращающегося ротора машин.

Цель исследования – повышение эффективности теплообмена технических систем и надежности узлов и агрегатов машин с вращающимися цилиндрами путем управления параметрами теплообменных процессов при нагнетании потоков флюидов через проницаемую поверхность.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие основные задачи исследования:

– определить влияние на теплоотдачу от поверхности вращающегося цилиндра таких факторов, как изменение скорости вращения цилиндров, вынужденное осевое течение, наличие на поверхности цилиндров различной рельефной структуры;

– разработать методику численного решения задачи теплообмена, учитывающего особенности течения в зазоре между вращающимися соосными цилиндрами (течение Куэтта-Тэйлора) с протоком через поверхность внутреннего цилиндра и обосновать точность этого решения;

– определить влияние расхода флюидов, скорости вращения цилиндра на теплообмен и гидравлические потери;

– разработать рекомендации для обеспечения равномерного протекания потоков флюидов через проницаемую поверхность вращающегося цилиндра.

Научная новизна исследований:

1. Предложена и обоснована возможность применения радиальных потоков флюидов через поверхность вращающегося проницаемого цилиндра, что позволяет увеличить теплоотдачу с его поверхности от 1,5 до 3 раз и тем самым снизить среднюю температуру его поверхности на 10 – 30%.

2. Разработана методика численного моделирования задачи теплообмена в течении Куэтта-Тэйлора, впервые учитывающая интенсивность протока флюидов через поверхность вращающегося цилиндра.

3. Доказано, что применение радиальных потоков флюидов через поверхность вращающегося проницаемого цилиндра позволяет осуще-

ствлять переход от турбулентного режима течения к ламинарному, и тем самым управлять теплообменными процессами и структурой течения в зазоре между цилиндрами.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработана методика численного моделирования задачи теплообмена в течении Куэтта-Тэйлора, учитывающая проток флюидов через поверхность вращающегося цилиндра.

Использование радиального потока флюидов позволяет стабилизировать поток над вращающимся цилиндром и может устранить макровихревые структуры, что обеспечивает равномерное охлаждение поверхности валов и хвостовых частей турбин и роторов электрических машин за счёт экранирования слоем нагретаемого флюида и недеформированного пограничного слоя.

Разработаны рекомендации по обеспечению равномерного протекания потоков флюидов через проницаемую поверхность вращающегося цилиндра.

Предложен и запатентован способ охлаждения асинхронного электродвигателя с полым ротором.

Методология и методы исследования. Основные методологические принципы, лежащие в основе исследования, базируются на законах гидродинамики и теплофизики с применением расчетно-аналитических методов математического моделирования. В частности, теоретические исследования течения вязкой несжимаемой жидкости в кольцевом зазоре с проницаемой стенкой производились с помощью укороченных, на основе методов теории пограничного слоя, уравнений Навье-Стокса в цилиндрической системе координат.

Экспериментальные исследования проводились путем стендовых испытаний макета с закруткой потока в лаборатории НИПКИ «Параметр» ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ».

Положения, выносимые на защиту:

1. Создание радиально направленного течения флюидов через перфорированную поверхность вращающегося цилиндра с интенсивностью, определяемой радиальным числом Рейнольдса до 1500, позволяет увеличить теплоотдачу с его поверхности от 1,5 до 3 раз и тем самым снизить его температуру до 30%.

2. Для обеспечения равномерного охлаждения и устранения локальных перегревов вращающегося проницаемого цилиндра необходимо обеспечить равномерный проток флюидов через его поверхность, что достигается путем заполнения перфорации пористым материалом с коэффициентом сопротивления в диапазоне от $3,5 \cdot 10^5$ до $3,5 \cdot 10^6$.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные теоретические положения и выводы диссертации рассматривались и обсуждались на заседаниях и научно-теоретических семинарах кафедр «Теоретическая механика», «Радиофизика» ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ» и научно-технических конференциях: XVII международная научно-техническая конференция «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (г. Черкассы, 2012 г.); научно-практическая конференция «Наукові підсумки 2012 р.» (г. Харьков, 2012 г.); Всеукраинская конференция «Відкриті фізичні читання» (г. Алчевск, 2012 г., 2014 г.); XIV международная научно-техническая конференция АС ППІ «Промышленная гидравлика и пневматика» (г. Одесса, 2013 г.); Международная научно-практическая конференция «Открытые физические чтения» (г. Луганск, 2016 г.); научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых» (г. Алчевск, 2019 г.).

Результаты исследования реализованы в виде технологических рекомендаций по усовершенствованию охлаждения роторов электрических машин внедрены на ОДО «Первомайский электромеханический завод».

Отдельные положения диссертации используются в учебном процессе на кафедре «Радиофизика» факультета автоматизации и электротехнических систем ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ».

Публикации. Основные положения исследования отображены в 8 печатных работах, среди них 7 статей, опубликованных в рецензируемых научных журналах и изданиях, утвержденных ВАК ЛНР и РФ, 1 патент на полезную модель. Результаты исследований опубликованы в материалах 7 научных конференций, из них 3 международных.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, четырех разделов (19 подразделов), выводов к разделам, заключения, списка литературы из 95 позиции, 2 приложений. Общий объем диссертации – 155 страниц (138 страниц – основная часть). В разделах диссертации 65 рисунков и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность направления исследования, определяется цель работы и постановка проблемы диссертации. Определены объект, предмет исследования, методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов исследования и формы их апробации.

Первый раздел «Анализ способов интенсификации теплообмена вблизи вращающегося в ограниченном пространстве цилиндра» содержит 2 подраздела. В подразделе 1.1 «Условия физического

подобия» установлены параметры, характеризующие физическое подобие вынужденного движения флюидов и тепловых процессов в жидких (газообразных) средах, для обобщения известных результатов и определения закономерностей.

Подраздел **1.2 «Общая характеристика течения Куэтта-Тэйлора»** посвящен описанию течения в кольцевом зазоре между вращающимися соосными цилиндрами.

Подраздел **1.3 «Способы интенсификации теплообмена вблизи вращающегося цилиндра»** содержит обзор работ, связанных с интенсификацией теплообмена с поверхности вращающегося в ограниченном пространстве цилиндра в течении Куэтта-Тэйлора.

На основании анализа известных данных по теплообмену в течении между вращающимися соосными цилиндрами определено, что основными подходами к интенсификации теплообмена в зазоре между вращающимися цилиндрами являются увеличение скорости вращения цилиндров, наложение вынужденного осевого течения, нанесение на поверхности цилиндров различной рельефной структуры (например, продольных пазов или насечек); известные результаты свидетельствуют об ограниченном характере интенсификации теплоотдачи от ротора за счет вынужденного осевого течения и рельефа непроницаемой поверхности; практически неисследованными остаются закономерности конвективно-

го теплообмена вблизи поверхности вращающегося проницаемого цилиндра с учетом протока флюидов через его поверхность.

Второй раздел «Численное моделирование гидродинамических и тепловых процессов в течении Куэтта-Тейлора», состоит из 6 подразделов. В подразделе **2.1 «Характеристика течения и параметры подобия»** представлена схема течения (рисунок 1) между внутренним, вращающимся со скоростью Ω и внешним неподвижным цилиндрами.

В подразделе **2.2 «Характеристика сопряженной гидродинамической и тепловой задачи»**, даны описание и характеристика расчетной кольцевой

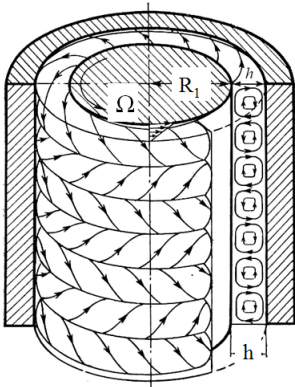


Рисунок 1 – Схема течения между внутренним вращающимся и неподвижным внешним цилиндрами

области между наружной поверхностью внутреннего цилиндра и внутренней поверхностью внешнего цилиндра.

Представлены уравнения движения и непрерывности среды в цилиндрической системе координат (r, φ, z) с учетом условия осевой симметрии течения ($\partial/\partial\varphi=0$), а также уравнение переноса тепла в цилиндрической системе координат при условии осевой симметрии.

В подразделе **2.3 «Основные подходы к расчетному моделированию»** представлены основные подходы к расчетному моделированию. Различные ламинарные течения флюидов моделируются на основе полных уравнений Навье-Стокса в трехмерной постановке.

Прямое численное моделирование на основе нестационарных уравнений Навье-Стокса практически применимо к потокам с небольшой степенью турбулентности. Наиболее доступным является использование различных моделей турбулентности в сочетании с осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса (RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes equations). Этот подход к численному моделированию менее требователен к вычислительным ресурсам, а также не имеет выраженного ограничения по степени турбулентности рассматриваемых течений.

Единственная дифференциальная модель турбулентности, применяемая вместе с RANS уравнениями, которая учитывает анизотропию турбулентности в сильнозакрученных потоках – это модель RSM переноса напряжений Рейнольдса.

В подразделе **2.4 «Постановка задачи и основные расчетные схемы»** поставлена расчетная задача течения Куэтта-Тейлора и показаны основные расчетные схемы. Плоская постановка оправдана только для случая отсутствия вторичных макровихревых течений (до центробежной

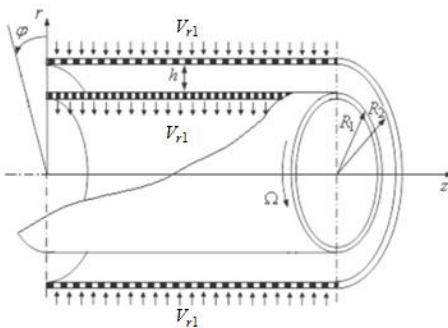


Рисунок 2 – Расчетная схема кольцевой области течения.

потери устойчивости) и равномерном распределении в осевом направлении скорости подачи и отвода потоков флюидов.

Для исследования макровихревых течений с протоком флюидов через продольные щели во вращающемся цилиндре необходимо рассматривать трехмерное течение. Для этой цели использована расчетная схема, изображенная на рисунке 2.

В основу расчетного исследования турбулентных течений в плоской и пространственной постановках положены осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS). В осесимметричной формулировке использованы аналоги указанных выше уравнений в цилиндрической системе координат. Для определения турбулентных напряжений используются замыкающие соотношения в соответствии с используемыми моделями турбулентности.

В постановку задачи входит формулировка граничных условий. В расчетных схемах предусматривается равномерная подача флюида через поверхность внешнего неподвижного цилиндра. Расчетные области представляют собой плоский и цилиндрический кольцевые сегменты соответственно, ограниченные в окружном направлении сечениями $\varphi = \varphi_0$ и $\varphi = \varphi_0 + \alpha$. На этих границах применяются периодические в окружном направлении граничные условия. Осесимметричная и пространственная формулировки нуждаются также в условиях на границах $z = 0, z = L$.

Подраздел **2.5 «Характеристика используемых моделей турбулентности»** посвящен обзору моделей турбулентности, используемых при моделировании течений флюидов. При описании течения Куэтта-Тейлора используются RANS уравнения вместе с подходящей дифференциальной моделью турбулентности, приспособленной для расчета пристенных течений и течений с кривизной линией тока. В качестве одной из рассматриваемых альтернатив модели RSM выбрана SST $k-\omega$ модель Ментера, которая в рамках применения гипотезы Буссинеска о скалярном коэффициенте турбулентной вязкости сочетает в себе лучшие свойства $k-\omega$ модели в пристенной области и преимущества $k-\varepsilon$ модели вдали от стенок.

В подразделе **2.6 «Основные схемные подходы в рамках конечно-объемной технологии»** представлены основные схемные подходы в рамках конечно-объемной технологии для моделирования течения Куэтта-Тейлора.

В подразделе **2.7 «Тестирование и верификация численного решения»** приведены результаты тестирования и верификации численного решения с использованием тестовой задачи, соответствующей изотермическому течению Куэтта-Тэйлора между непроницаемыми цилиндрами с вращением внутреннего, в осесимметричной постановке.

Показаны профили безразмерной окружной скорости осредненного движения и безразмерной температуры $\Theta(r) = (T(r) - T)/(T_2 - T)$ (рисунок 3) в кольцевом сечении между цилиндрами, полученные с применением RSM модели турбулентности (кривая 1) и модели SST $k-\omega$ (кривая 2) в сравнении с известными экспериментальными данными (кривая 3).

Установлено, что модель переноса напряжений Рейнольдса (RSM) демонстрирует более точные результаты при расчете температуры и в окрестности стенок.

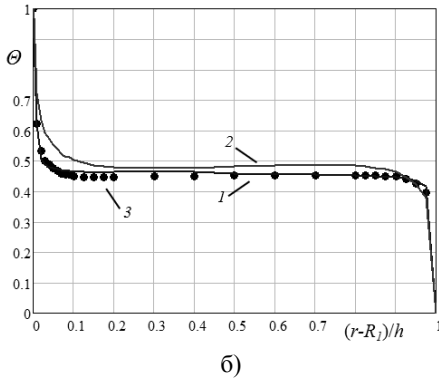
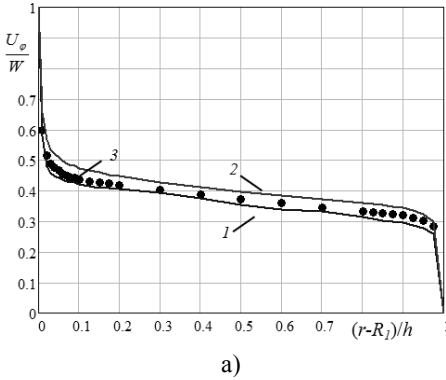


Рисунок 3 – Профили безразмерной окружной скорости (а) и безразмерной температуры (б)

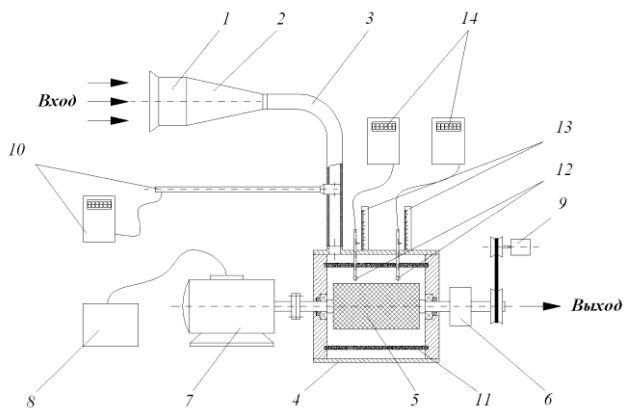
Подраздел 3.2 «Средства измерения и регулирования» содержит описание средств измерения и регулирования экспериментального стенда.

В подразделе 3.3 «Результаты измерений» приведены значения температуры в сечении кольцевой области между вращающимся и неподвижным цилиндрами, полученные при экспериментальных исследованиях течения Куэтта-Тейлора с наложенным вынужденным радиальным течением.

Подраздел 3.4 «Анализ экспериментальных данных» посвящен анализу результатов экспериментальных исследований, в ходе которого построены профили безразмерной температуры в зазоре между цилиндрами. Данные профили температуры сопоставлены с профилями, полученными численным моделированием при отсутствии (рисунок 5.а) и наличии (рисунок 5.б) радиального течения флюидов при одной и той же скорости вращения.

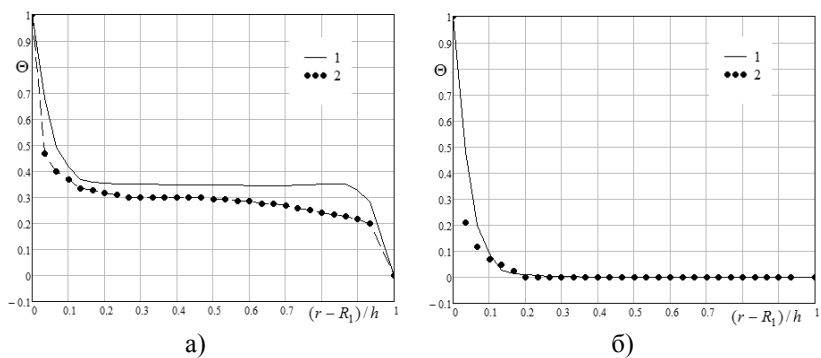
Третий раздел «Экспериментальные исследования тепловых процессов снаружи вращающегося пронцаемого цилиндра» содержит 4 подраздела, в которых выполнены экспериментальные исследования течения Куэтта-Тейлора с наложенным вынужденным радиальным течением.

В подразделе 3.1 «Характеристика экспериментальной установки» представлена характеристика экспериментального стенда (рисунок 4) по изучению профиля температуры в зазоре между вращающимся пронцаемым внутренним цилиндром и неподвижным внешним.



1 – вентилятор, 2 – конфузор, 3 – воздуховод, 4 – корпус модели,
 5 – вращающийся проницаемый цилиндр, 6 – коллекторный блок,
 7 – электродвигатель, 8 – преобразователь частоты, 9 – тахометр,
 10 – измеритель скорости, 11 – пористая цилиндрическая перегородка,
 12 – термомпара, 13 – линейка, 14 – вольтметр

Рисунок 4 – Схема экспериментального стенда



1 – профиль температуры, полученный по результатам численного моделирования; 2 – профиль температуры, полученный по экспериментальным значениям

Рисунок 5 – Профиль температуры вблизи поверхности вращающегося проницаемого цилиндра при отсутствии (а) и наличии (б) радиального течения флюидов

Результаты экспериментальных исследований распределения температуры в сечениях кольцевой области подтверждают основные теоретические положения о влиянии протока флюидов на характер и режим течения и на профиль температуры в исследуемом течении.

Четвертый раздел «Теплообмен вблизи поверхности вращающегося цилиндра при протокe потоков флюидов» содержит 6 подразделов, в которых представлены зависимости влияния расхода потоков флюидов и скорости вращения цилиндра на теплообмен и гидравлические потери течения Куэтта-Тейлора.

В подразделе **4.1 «Неравномерность протекания потоков флюидов через вращающийся пористый цилиндр»** показаны особенности течения потоков флюидов через поверхность пористого цилиндра.

Сопrotивление пористой перегородки пористого цилиндра оказывает существенное влияние на структуру течения в зазоре между цилиндрами и равномерность его проникания через поверхность внутреннего вращающегося цилиндра. По результатам численного моделирования установлено (рисунок 6), что при величине сопротивления $c = 10^{11} \text{ м}^{-2}$ пористой перегородки I весь поток флюидов равномерно распределяется вдоль её поверхности (рисунок 6а). При $c = 10^4 \text{ м}^{-2}$ часть поверхности пористого цилиндра блокируется для протока флюидов (рисунок 6.б).

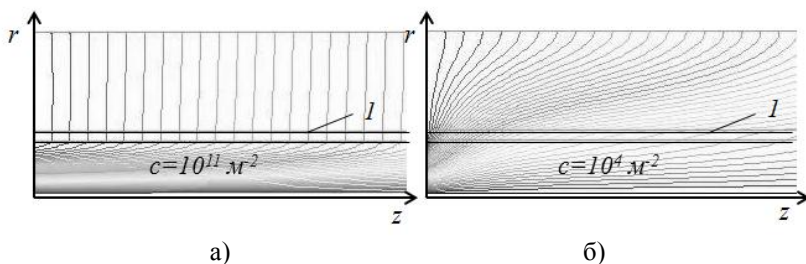


Рисунок 6 – Линии тока относительного движения потоков флюидов, пересекающих входное сечение пористого цилиндра

При большом значении сопротивления пористой перегородки присутствует макровихревое движение, однако оно сосредоточено в кольцевой области над перегородкой и отеснено потоком от входного сечения. В этом случае имеет место близкое к равномерному распределение скорости протока флюидов через пористый цилиндр. При небольшом значении коэффициента сопротивления вторичные вихревые течения проникают сквозь пористую перегородку, что сопровождается обратными течениями через нее.

В подразделе 4.2 «Влияние сопротивления проницаемой поверхности» установлена зависимость изменения коэффициента неравномерности k_{vr} от радиального числа Рейнольдса, характеризующего интенсивность нагнетания потоков флюидов, при различных значениях вращательного числа Рейнольдса.

Получены данные величины коэффициента неравномерности k_{vr} (рисунок 7) для различных величин безразмерного коэффициента сопротивления пористой перегородки (1 - $\tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^7$; 2 - $\tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^6$; 3 - $\tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^5$; 4 - $\tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^4$; 5 - $\tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^3$; 6 - $\tilde{b}_r = 3.85 \cdot 10^2$; 7 - $\tilde{b}_r = 38.5$; 8 - $\tilde{b}_r = 3.85$).

Сопоставление данных по величине коэффициента k_{vr} и характера течения (на основе картин линий тока) показывает, что неравномерность распределения скорости с уменьшением сопротивления перегородки сопровождается двумя основными проявлениями. Во-первых, это увеличение скорости V_{r1} вблизи того торца, у которого расположено выходное сечение. Во-вторых, наличие макровихрей, которые обуславливают местное увеличение и уменьшение радиальной скорости вблизи перегородки.

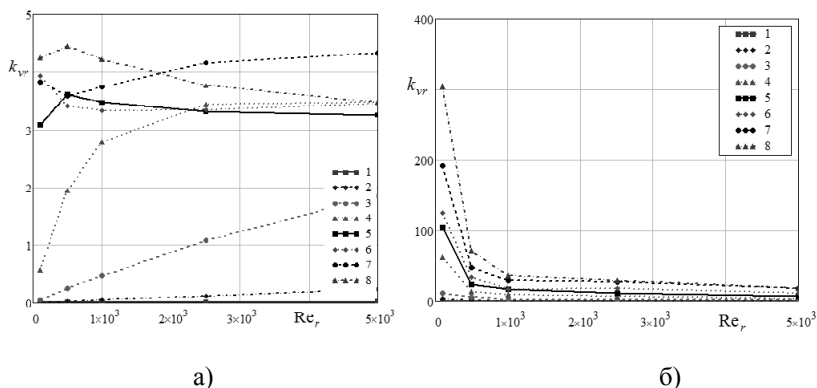


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента неравномерности протекания потоков флюидов через вращающийся пористый цилиндр радиального числа Рейнольдса и коэффициента сопротивления пористой перегородки для $Re_\varphi = 1 \cdot 10^4$ (а) и $Re_\varphi = 2 \cdot 10^5$ (б)

В ходе численного моделирования в подразделе 4.3 «Теплообмен вблизи поверхности вращающегося цилиндра при нагнетании потоков флюидов» получены данные об изменении коэффициента тепло-

отдачи от вращающегося цилиндра при нагнетании потоков флюидов через продольные щели для значений окружных чисел Рейнольдса $Re_\varphi = 4.1 \cdot 10^4$ – $Re_\varphi = 2 \cdot 10^5$, которые демонстрируют перспективность этого способа интенсификации теплообмена.

Исследования показали что, Nu^* растет с увеличением скорости нагнетания при различных значениях Re_φ (рисунок 8), определяемого частотой вращения пронизываемого цилиндра. Однако, если при $Re_\varphi = 4.1 \cdot 10^4$ ($Ta_m = 3.8 \cdot 10^7$) прирост Nu^* замедляется с ростом, то с увеличением Re_φ эта тенденция постепенно меняется, и при $Re_\varphi = 2 \cdot 10^5$ прирост числа Нуссельта с увеличением Re_r растет, по крайней мере, в области $Re_r < 1500$.

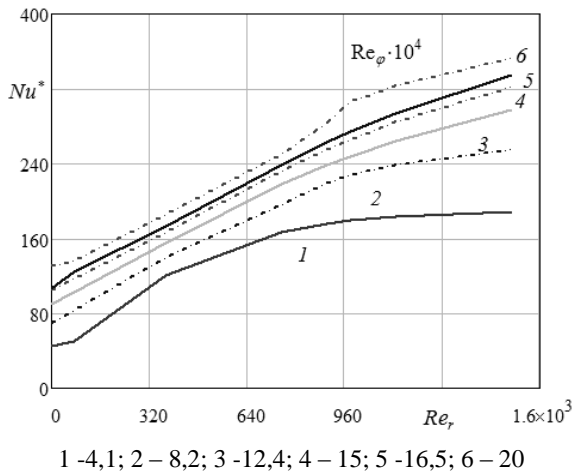


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента теплоотдачи от интенсивности потока флюидов через поверхность вращающегося цилиндра

По результатам численного моделирования установлен прирост коэффициента теплообмена (рисунок 9) в случае потока флюидов к его значению Nu_0^* при $Re_r = 0$.

Фактор нагнетания потоков флюидов позволяет повысить (от 3 до 4 раз) интенсивность теплообмена между вращающимся цилиндром и потоком, что заметно больше того эффекта, который по данным выполненного обзора могут обеспечить вынужденное осевое течение и пазы в цилиндрах.

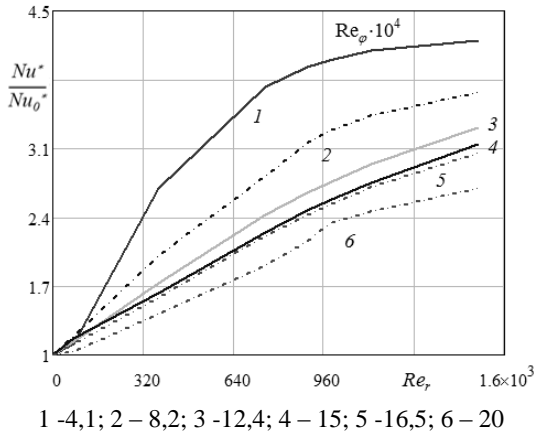


Рисунок 9 – Прирост коэффициента теплоотдачи с ростом интенсивности потока флюидов через поверхность вращающегося цилиндра

Получено соотношение прироста теплоотдачи к приросту момента трения, для непроницаемых цилиндров при $Re_\phi = 4.1 \cdot 10^4 \dots 2 \cdot 10^5, Re_r = 0$ (рисунок 10, кривая 1), при нагнетании потоков флюидов – $Re_\phi = 4.1 \cdot 10^4 = const, Re_r = 0 \dots 1500$ (рисунок 10, кривая 2) и при наличии продольных пазов в непроницаемых цилиндрах – $Re_\phi = 4.1 \cdot 10^4 = const, Re_r = 0$ (рисунок 10, прямая 3).

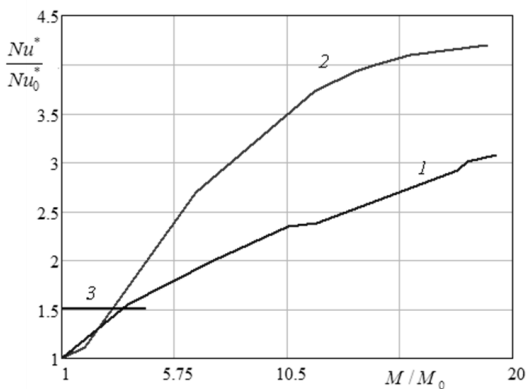


Рисунок 10 – Прирост коэффициента теплообмена в зависимости от момента гидродинамического сопротивления

В подразделе 4.4 «Управление теплообменными процессами снаружи вращающегося цилиндра за счет нагнетания потоков флюидов через его поверхность» показано, что в технических устройствах и технологических процессах, когда конструктивно возможно обеспечить проток флюидов сквозь поверхность цилиндра, увеличивается коэффициент теплоотдачи в 3 – 5 раз по сравнению со случаем непроницаемого гладкого цилиндра.

При отсутствии нагнетания флюида в большинстве практически значимых случаев имеет место макровихревое движение, следствием которого является неравномерность температуры ротора в осевом направлении (рисунок 11).

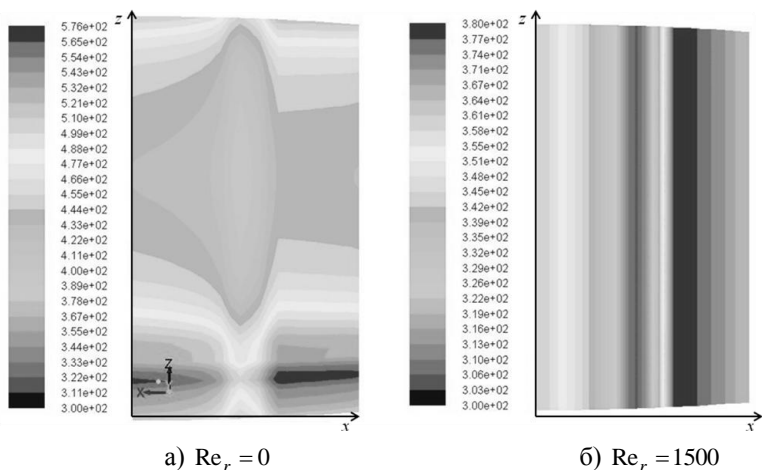


Рисунок 11 – Распределение температуры поверхности температуры ротора в осевом направлении ($Re_\varphi = 1.24 \cdot 10^5$)

Применение нагнетания потоков флюидов через поверхность вращающегося цилиндра позволяет не только устранить локальные перегревы, но и снизить среднюю температуру его поверхности в 1,5 – 3 раза. На рисунке 12 представлено изменение средней температуры поверхности вращающегося цилиндра при различной скорости вращения цилиндра (1 - $Re_\varphi = 8.3 \cdot 10^3$; 2 - $Re_\varphi = 4.1 \cdot 10^4$; 3 - $Re_\varphi = 8.2 \cdot 10^4$; 4 - $Re_\varphi = 1.24 \cdot 10^5$; 5 - $Re_\varphi = 1.5 \cdot 10^5$; 6 - $Re_\varphi = 1.65 \cdot 10^5$; 7 - $Re_\varphi = 2 \cdot 10^5$).

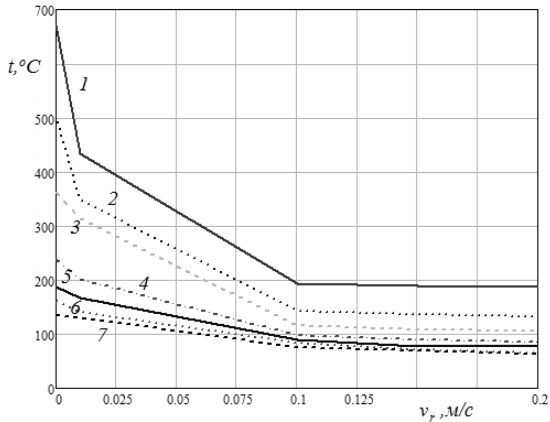


Рисунок 12 – Изменение средней температуры поверхности вращающегося цилиндра

При равном увеличении момента гидродинамического поверхностного трения, проток флюидов через поверхность вращающегося цилиндра с неизменной угловой скоростью, обеспечивает прирост коэффициента теплообмена в 1,5 – 2 раза больший, чем увеличение на порядок угловой скорости (от $Re_\varphi \sim 10^4$ до $Re_\varphi \sim 10^5$) непроницаемого цилиндра.

Коэффициент теплообмена между вращающимся цилиндром и потоком при постоянной скорости нагнетания потоков флюидов ($Re_r = const$) существенно зависит от коэффициента «живого» сечения проникаемого цилиндра. В частности, с увеличением k_S от значения 0,17 до 1, коэффициент теплообмена увеличивается в 3,5 раза при $Re_\varphi \approx 10^4$. С ростом Re_φ эта разница уменьшается и при $Re_\varphi \approx 2 \cdot 10^5$ составляет 40%.

Подраздел **4.5 «Применение нагнетания потоков флюидов через поверхность вращающегося цилиндра»** посвящен применению радиальных потоков флюидов для увеличения ресурса эксплуатации агрегатов механизмов. Вдвух холодного потока флюидов в пограничный слой можно применить как способ защиты поверхностей валов и хвостовых частей газовых турбин от перегрева в случае обтекания их высокотемпературным потоком. Щелевой вдвух можно использовать для стабилизации потока при интенсивности $Re_r < 100$, что обеспечивает отсутствие макровихрей в диапазоне $Re_\varphi < 1000$.

Создание роторов электрических машин с радиальной перфорацией позволит обеспечить более интенсивное охлаждение и уменьшить тем-

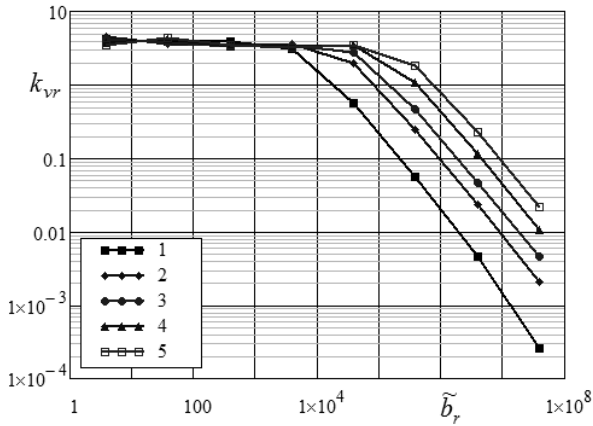
пературу обмоток. Снижение температуры изоляции повышает её срок службы, а так же и повысить срок службы двигателя. Для асинхронного электродвигателя ДАЗО 9П 450Х4 с изоляцией класса F температура обмоток ротора при нормальном режиме работы составляет 105 °С. В ходе лабораторных испытаний на ОДО «Первомайский электромеханический завод им. К. Маркса» после модернизации системы охлаждения предложенным способом было установлено, что температура обмоток ротора составляет 101 °С. Срок службы данного двигателя при нормальных условиях эксплуатации составляет 25 лет. Прогнозируемый срок службы двигателя с усовершенствованной системой охлаждения составит 32 года.

Таким образом, использование вынужденного радиального течения сквозь поверхность ротора позволяет повысить срок службы эксплуатации асинхронных электродвигателей.

В подразделе **4.6 «Обеспечение равномерного протока флюидов через поверхность вращающегося цилиндра»** показаны условия, при которых устраняются локальные перегревы, и обеспечивается равномерное охлаждение поверхности вращающегося цилиндра. Это обеспечивается посредством сочетания сопротивления \tilde{b}_r проницаемой щели и скорости нагнетания потоков флюидов, при которых коэффициент неравномерности k_{vr} протекания флюидов через вращающийся пористый цилиндр будет иметь минимальное значение.

При невысоких скоростях вращения ($Re_\varphi = 1 \cdot 10^4$) ротора скорость радиальных потоков флюидов через его поверхность не сказывается на равномерности протока вдоль щели в диапазоне значений коэффициента сопротивления $\tilde{b}_r = 3.85 - 3.85 \cdot 10^3$. Дальнейший рост сопротивления пористой щели приводит к существенному снижению коэффициента неравномерности k_{vr} (рисунок 13).

Для обеспечения равномерного протока жидкости (газа) сквозь поверхность вращающегося ротора необходимо задать коэффициент сопротивления пористой щели в диапазоне $3.5 \cdot 10^5 (Re_r = 100) - 3.5 \cdot 10^8 (Re_r = 5000)$ для значений окружного числа Рейнольдса от $Re_\varphi = 1 \cdot 10^4$ до $Re_\varphi = 2 \cdot 10^5$. При данных значениях сопротивления пористой щели \tilde{b}_r значение коэффициента неравномерности остаётся.



1 – $Re_r = 100$; 2 – $Re_r = 500$; 3 – $Re_r = 1000$; 4 – $Re_r = 2500$; 5 – $Re_r = 5000$.

Рисунок 13 – Зависимость коэффициента неравномерности протекания флюида через вращающийся пористый цилиндр от коэффициента сопротивления пористой перегородки и радиального числа Рейнольдса при постоянной скорости вращения ($Re_\varphi = 1 \cdot 10^4$)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, в которой решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в обосновании способа повышения эффективности теплообмена технических систем с вращающимися цилиндрами путем управления параметрами теплообменных процессов при нагнетании потоков флюидов через проницаемую поверхность, а так же повышения надежности узлов и агрегатов машин.

Основные научные и практические результаты работы:

1. Разработана методика численного моделирования задачи теплообмена, впервые учитывающая особенности течения Куэтта-Тэйлора с интенсивным протоком флюидов через поверхность вращающегося цилиндра. Модель переноса напряжений Рейнольдса (RSM) является наиболее точной моделью турбулентности для численного решения задачи теплообмена в течении Куэтта-Тэйлора. Показано, что численное решение демонстрирует возникновение макровихрей при значениях, очень близких к достоверно известному значению $Ta=41,3^2$.

2. Установлено влияние расхода ламинарных потоков флюидов наложенного вынужденного радиального течения и скорости вращения цилиндра на теплообмен и гидравлические потери в течении Куэтта-Тэйлора. Наличие радиального течения позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи от 1,5 до 3 раз и тем самым снизить среднюю температуру поверхности вращающегося цилиндра на 10 – 30%.

3. Определено, что применение радиальных потоков флюидов через поверхность вращающегося проницаемого цилиндра позволяет управлять теплообменными процессами и структурой течения в зазоре между цилиндрами за счет устранения макровихревых структур и перехода от турбулентного режима течения к ламинарному.

4. Разработаны рекомендации по обеспечению равномерного протекания потоков флюидов через проницаемую поверхность вращающегося цилиндра.

Отдельные положения диссертации используются в учебном процессе на кафедре «Радиофизика» факультета автоматизации и электротехнических систем ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ».

Основные научные публикации по теме диссертационного исследования

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при МОН ЛНР для публикации основных результатов диссертационных исследований

1. Юрьев, С.А. Интенсивность обмена импульсом и теплотой в потоке снаружи вращающегося проницаемого цилиндра / Е.В. Мочалин, С.А. Юрьев // Промислова гідраліка і пневматика. – Винниця: Глобус-прес, 2011. – Вып. 34(4). – С. 11-14.

2. Юрьев, С.А. Теплообмен и гидравлические потери в зазоре между вращающимися цилиндрами / Е.В. Мочалин, С.А. Юрьев // Технологічний аудит і резерви виробництва. – Харків: ПП «Технологічний Центр», 2013. – Вып. 3/1(11). – С. 45-49.

3. Юрьев, С.А. Интенсификация теплоотдачи от вращающегося цилиндра за счёт протока жидкости через его поверхность / Е.В. Мочалин, С.А. Юрьев // Промислова гідраліка і пневматика. – Винниця: Глобус-прес, 2013. – Вып. 3(41). – С. 33-36.

4. Юрьев, С.А. Расчетный подход к моделированию турбулентного течения в кольцевом зазоре между вращающимися цилиндрами / Е.В. Мочалин, С.А. Юрьев // Сборник научных трудов Донбасского го-

сударственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2014. – Вып. 2(43). – С. 122-127.

5. Юрьев, С.А. Особенности течения жидкости через вращающийся пористый цилиндр / С.А. Юрьев // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2015. – Вып. 2(45). – С.136-141.

6. Юрьев, С.А. Повышение эффективности воздушного охлаждения электродвигателя с полым ротором / В.В. Мурга, И.В. Жихарев, С.А. Юрьев // Физика и техника высоких давлений. – Донецк: ГУ ДонФТИ, 2019. – Том 29(1). – С. 104-109.

7. Юрьев, С.А. Применение радиального течения воздушного потока для охлаждения СВЧ-плазмотрона / И.А. Карпук, С.А. Юрьев // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2019. – Вып. 58. – С. 94-98.

Доклады на научных конференциях

8. Юрьев, С.А. Интенсификация теплоотдачи от вращающегося цилиндра за счёт протока жидкости через его поверхность / Е.В. Мочалин, С.А. Юрьев // «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці»: матеріали XVII міжнародної науково-технічної конференції, 17-20 квітня 2012. – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля МЧСУ, 2012. – С. 73.

9. Юрьев, С.А. Влияние сопротивления проницаемой поверхности вращающегося цилиндра на структуру течения с его внешней стороны [текст] / С.А. Юрьев. // «Наукові підсумки 2012 р.»: матеріали науково-практичної конференції «Технологічний аудит і резерви виробництва», 20 грудня 2012. – Харків: ПП «Технологічний Центр», 2012. – Вып. 6/3(8). С. – 17-18.

10. Юрьев, С.А. Интенсификация теплоотдачи от вращающегося цилиндра / Е.В. Мочалин, С.А. Юрьев // «Відкриті фізичні читання»: Всеукраїнська конференція, 11 травня 2012. – Алчевск: ДонГТУ, 2012. – С. 39.

11. Юрьев, С.А. Экспериментальные исследования теплоотдачи от вращающегося цилиндра при прооре жидкости через поверхность / Е.В. Мочалин, В.С. Пупков, С.А. Юрьев // «Промышленная гидравлика и пневматика»: материалы XIV международной научно-технической конференции АС ПГП, г. Одесса, 18-19 сентября 2013г. – Винница: Глобус-прес, 2013. – С. 26.

12. Юрьев, С.А. Расчетный подход к моделированию турбулентно-го течения в кольцевом зазоре между вращающимися цилиндрами / Е.В. Мочалин, С.А. Юрьев // «Відкриті фізичні читання»: матеріали всеукраїнської конференції, 16 травня 2014. – Алчевск: ДонГТУ, 2014. – С. 8-19.

13. Юрьев, С.А. Моделирование турбулентного течения в кольцевом зазоре между вращающимися цилиндрами / С.А. Юрьев // «Открытые физические чтения»: тезисы докладов международной научно-практической конференции, 20 мая 2016. – Луганск: ЛГУ им. Т. Шевченко, 2016. – С. 67.

14. Юрьев, С.А. Повышение эффективности воздушного охлаждения электродвигателя с полым ротором / С.А. Юрьев // «Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых»: материалы научно-практической конференции, 19 марта 2019. – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. – С. 18-20.

Патенты

15. Пат. 87414 Украина, МПК Н02К 17/00. Асинхронный электродвигун з порожнистим ротором / Е.В. Мочалин, А.А. Бревнов, С.А. Юрьев; Заявитель Донбасский государственный технический университет. – № u201309098; заявл.19.07.2013; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 3. – 4 с.

АННОТАЦИЯ

Юрьев С. А. Обоснование повышения эффективности процессов теплообмена радиальными потоками флюидов в машинах с цилиндрами вращения. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) – ГОУ ВО ЛНР «Донбасский государственный технический институт». – Алчевск, 2020.

В диссертационной работе изложены результаты исследований влияния расхода потока флюидов вынужденного радиального течения и скорости вращения цилиндра на теплообмен и гидравлические потери в течении Куэтта-Тэйлора.

Разработана методика численного моделирования задачи теплообмена в течении Куэтта-Тэйлора, учитывающая интенсивный проток флюидов через поверхность вращающегося цилиндра.

Доказано, что применение радиальных потоков флюидов через поверхность вращающегося проницаемого цилиндра позволяет осуществлять переход от турбулентного режима течения к ламинарному, и тем самым управлять теплообменными процессами и структурой течения в зазоре между цилиндрами.

Исследованы условия равномерного распределения скорости потока флюидов через проницаемую поверхность вращающегося цилиндра.

Показана возможность применения радиальных потоков флюидов для увеличения ресурса эксплуатации агрегатов механизмов.

Результаты исследования изложены в 7 научных статьях.

Ключевые слова: конвективный теплообмен, вращающийся проницаемый цилиндр, течение Куэтта-Тэйлора, численное моделирование.

SUMMARY

Yuriev S. A Substantiation of increasing the efficiency of heat transfer processes by radial fluid flows in machines with cylinders of rotation.
- Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical Sciences in the specialty 05.02.13-Machines, aggregates and processes (by industry) – SEI HE LPR «Donbass state technical institute». – Alchevsk, 2020.

The dissertation work presents the results of studies of the influence of the flow rate of fluids of forced radial flow and the speed of rotation of the cylinder on heat transfer and hydraulic losses in the Couette-Taylor flow.

A method for numerical simulation of the problem of heat transfer in the Couette-Taylor flow has been developed, taking into account the intense flow of fluids through the surface of a rotating cylinder.

It has been proved that the use of radial fluid flows through the surface of a rotating permeable cylinder allows the transition from a turbulent flow regime to a laminar one, and thereby control heat exchange processes and the flow structure in the gap between the cylinders.

The conditions for the uniform distribution of the velocity of the flow of fluids through the permeable surface of a rotating cylinder are investigated.

The possibility of using radial fluid flows to increase the service life of the mechanism units is shown.

The research results are presented in 7 scientific articles.

Key words: convective heat transfer, rotating permeable cylinder, Couette-Taylor flow, numerical simulation.