

2.4. ЛАБОРАТОРИЯ ПРОБЛЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Заведующий д. т. н. М.И. Низовцев

тел. (383) 316-53-36

Основные направления деятельности

- Экспериментально-теоретические исследования и их практическая реализация в области теплообменного оборудования и строительной теплофизики
- Исследование процессов интенсификации тепло- и массообмена в пористых материалах и многофазных потоках
- Развитие научных подходов при решении инженерных задач энерго- и ресурсосбережения
- Разработка приборов и измерительных средств для теплофизических экспериментов

Результаты научно-исследовательских работ 2019 г.

Проект: Ш.18.2.4: **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАС-СООБМЕНА С ЦЕЛЮ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ, СТРОИТЕЛЬСТВА, ХИМИЧЕСКОЙ И НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ** (Гос. рег. АААА-А17-117022810196-0, ГЗ 0322-2016-0012)

Задание: Разработать физико-математическую модель тепло- и массопереноса испаряющихся капель различного состава. Выполнить численные расчеты и сопоставить результаты расчетов с экспериментальными данными.

В рамках работы по проекту разработана физико-математическая модель тепло- и массопереноса испаряющихся капель различного состава. В основу физико-математической модели положены представления о квазистационарном испарении одиночных свободных капель жидкости в безграничной парогазовой среде, компоненты которой подчиняются законам идеального газа. Предполагается относительно невысокая интенсивность массоотдачи. В результате допускается независимость концентрации парогазовой смеси от расстояния до капли. В модели полагается, что процесс испарения капли переменного состава обусловлен диффузией паров в неконденсируемом газе, а также потоком Стефана, индуцированным испарением и свободной конвекцией. Считается, что процесс диффузии компонентов в газовой фазе описывается законом Фика. Интенсивность теплообмена на поверхности сферы постоянного диаметра принимается в

соответствии с эмпирическим соотношением Ранца-Маршала для свободной конвекции. Отклонение свойств водного раствора этанола от идеального учитывается с помощью эмпирических данных. Для этого используются табличные зависимости давления пара этанола над водными растворами различной концентрации. В результате такой обработки получена обобщенная эмпирическая зависимость давления паров этанола и воды над поверхностью раствора от мольной доли этанола в жидкой фазе для различных температур. Рассматривалось испарение капель бинарных растворов в воздушной среде при умеренной температуре и невысокой относительной влажности. Исследования на примере водного раствора этанола показали отклонение от «закона d^2 », что связано с двухстадийным режимом испарения раствора. Когда концентрация этанола в растворе значительна, именно он даёт наибольший вклад в изменение количества вещества капли при испарении, поскольку скорость его испарения выше. Наблюдаемое отклонение от линейности это результат того, что сначала преимущественно испаряется более летучий компонент – этанол. Когда его концентрация в растворе падает, то преобладающий вклад в изменение масса капли начинает давать испарение воды. При низкой концентрации этанола температура капли при испарении близка к температуре адиабатного испарения воды для условий окружающего воздуха, при высокой концентрации этанола она близка к температуре адиабатного испарения этанола. Все температурные зависимости для промежуточных значений концентрации этанола находятся внутри этого диапазона.

В рамках верификации физико-математической модели был проведен цикл экспериментов по исследованию испарения капель водно-спиртового раствора с различной относительной массовой концентрацией этанола: 0% (вода), 25, 50, 75, 92% при постоянной температуре и влажности воздуха ($t = 24^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 3\%$). При испарении измерялись времена испарения, диаметр капель и температура их поверхности. Определение размеров капель осуществлялось методом видеофиксации изображения капель цифровым микроскопом. Температура поверхности капель определялась бесконтактным методом инфракрасной термографии. На рисунках приведены результаты экспериментов и расчетные зависимости температуры капель с начальной концентрацией этанола 20% и 75% соответственно.

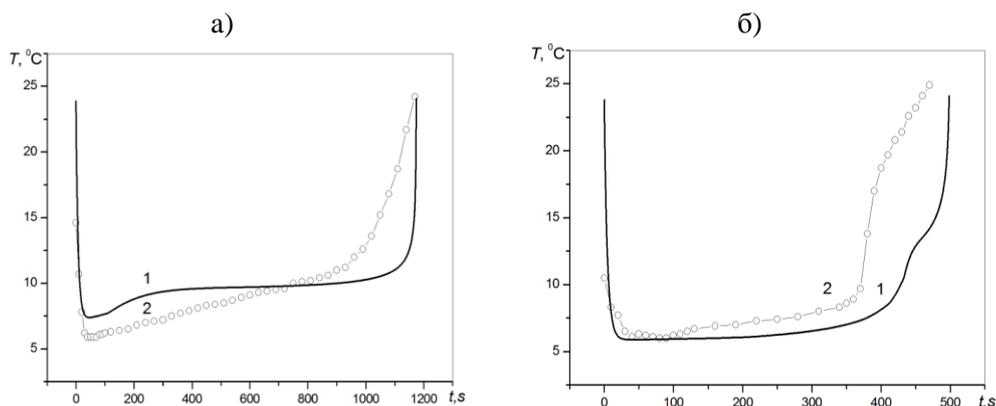


Рис. 1. Сравнение зависимости расчетной температуры (1) капли с $d_0=1,6$ мм от времени с экспериментом (2) при испарении в воздух с температурой 24°C и относительной влажностью 3% при начальной массовой концентрации этанола в растворе 20% (а) и 75% (б).

Полученные данные показывают, что при испарении капля водно-спиртового раствора с различной массовой концентрацией этанола наблюдаются три характерные фазы испарения, ранее отмеченные при испарении однокомпонентных капель: начальный участок резкого падения температуры; стадия постоянной температуры, и стадия плавного повышения до температуры окружающего воздуха. Представленные на рисунке результаты математического моделирования испарения каплей водно-спиртового раствора с экспериментальными данными демонстрируют удовлетворительное согласие по времени испарения каплей. При сравнении зависимостей температуры каплей от времени можно говорить лишь о некотором качественном соответствии. Причины наблюдаемых расхождений, возможно, связаны с не учетом неоднородного распределения концентрации этанола в объеме капли, не стационарностью процесса испарения, а также с допущением об однородности температуры капли. Для точного описания характера изменения температуры каплей необходимо модифицировать квазистационарную модель испарения, учесть не стационарность процесса, неоднородность распределения компонентов по объему капли, а также особенности гидродинамических течений внутри самой капли.

Задание: Экспериментально исследовать зависимости температур и скоростей испарения подвешенных капель наножидкостей.

При экспериментальном исследовании процесса испарения подвешенной капли наножидкости, представляющей собой смесь дистиллированной воды и 0.1% массовой концентрации частиц диоксида кремния со средним диаметром 12 нм в условиях свободной и слабой принудительной конвекции ($Re < 10$), обнаружены свойства характерные при испарении каплей смеси чистых жидкостей с разной степенью летучести.

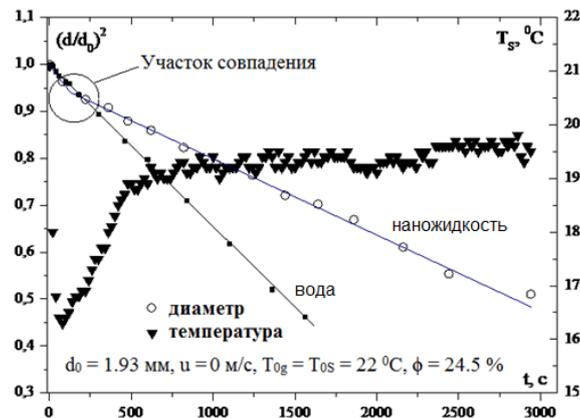


Рис.2. Изменение температуры и квадрата диаметра капли наножидкости в процессе испарения.

В результате анализа экспериментальных данных отмечено, что, находясь в одинаковых условиях слабоподвижного воздуха с температурой $20^{\circ}\text{C} \div 25^{\circ}\text{C}$, капли наножидкости испаряются медленнее по сравнению с каплями базовой жидкости. Закон изменения диаметра капель наножидкости имеет отклонение от линейного закона d^2 .

Характер поведения температуры поверхности капли наножидкости при испарении подобен изменению температуры поверхности капли смеси чистых жидкостей с разной степенью летучести. Зависимость изменения квадрата диаметра капли наножидкости во время испарения имеет два участка, которые можно аппроксимировать прямыми с разным углом наклона. На начальном участке закон изменения для наножидкости совпадает с законом испарения для капли базовой жидкости. Временной интервал, в течение которого происходит изменение наклона прямых линий, совпадает по времени с повышением температуры поверхности капли (рис.2).

Задание: Разработать физико-математическую модель работы рекуперативного воздушного теплообменника с капельным орошением. Создать программу расчета по предложенной модели, провести ее верификацию на результатах экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования выявили существенную роль фазовых превращений на тепло- и массообменные процессы в рекуперативных воздушных теплообменниках с капельным орошением раствором CaCl_2 . Было установлено, что процессы конденсации и испарения промежуточного теплоносителя в греющей и охлаждающей колонне оказывают различное влияние на эффективность работы теплообменника в целом. Это привело к необходимости усовершенствования экспериментального стенда для того, чтобы обеспечить возможность исследования процессов в греющей и охлаждающей колонке независимо друг от друга. Фотография и схема нового экспериментального стенда приведена на рис.3. На стенде были проведены модельные эксперименты по определению равномерности распределения теплоносителя, эффективности греющей и охлаждающей колонок. По результатам экспериментов была проведена разработка новой физико-математической модели, которая позволяет учитывать особенности тепло- и массообмена в насадочных колоннах с малой интенсивностью орошения промежуточным теплоносителем. Была разработана трехтемпературная модель теплообменника, которая учитывает отличия в температурах насадки, воздушного потока и промежуточного теплоносителя в зависимости от режима работы теплообменника. В модели также учтено наличие не смоченных областей насадки, возможность фазовых превращений, как на поверхности жидкого теплоносителя, так и на не смоченной поверхности насадки.

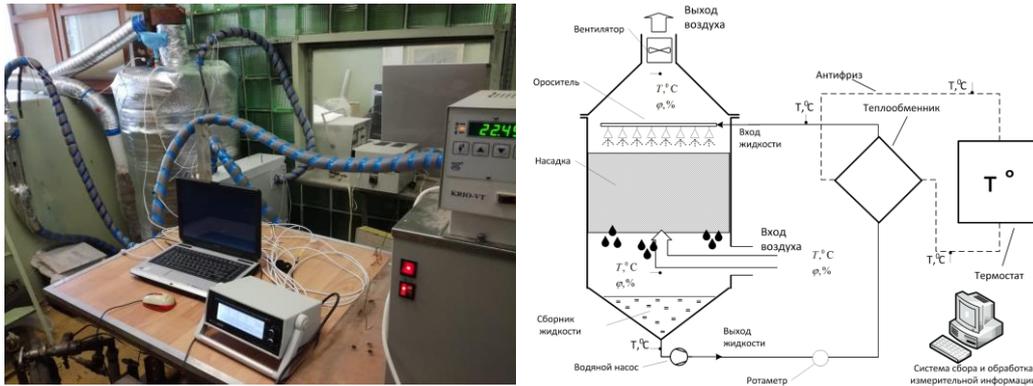


Рис. 3. Экспериментальный стенд для исследования тепло-м массообмена с фазовыми превращениями в насадочных колоннах

Разработанное программное обеспечение позволило провести серию расчетов для валидации модели. Согласно результатам расчетов и экспериментов влажностная и тепловая эффективность регенератного теплообменника с промежуточным теплоносителем зависит от отношения водяных эквивалентов промежуточного теплоносителя и воздуха. В режиме охлаждающей колонки температурная эффективность уменьшалась при уменьшении отношения водяных эквивалентов (рис.4), а влажностная наоборот возрастала.

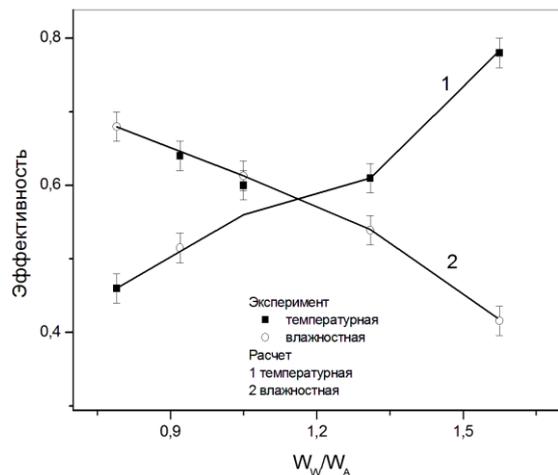


Рис. 4. Зависимость эффективности от отношения водяных эквивалентов жидкости и воздуха для охлаждающей колонки

Всё это позволяет сделать выводы об адекватности предложенной модели и говорить об удовлетворительных результатах ее верификации.

Задание: Разработать документацию и изготовить макетный образец поточного вискозиметра, провести его испытание на лабораторном стенде.

Создан и испытан макетный образец прибора для непрерывного измерения вязкости жидкости, транспортируемой по трубопроводу. Способ измерения вязкости жидкости с помощью этого прибора основан на использовании особого

целевого сужающего устройства (СУ). В алгоритме вычисления вязкости применена безразмерная калибровочная зависимости $\lambda = f(\text{Re})$ для СУ, где $\lambda = \Delta P / (\rho V^2 / 2)$ - коэффициент сопротивления СУ, $\text{Re} = VD/\nu$ - число Рейнольдса, ΔP - перепад давления на СУ, ρ - плотность жидкости, V - средняя скорость жидкости во входном сечении прибора, D - присоединительный диаметр прибора, ν - кинематическая вязкость жидкости.

Измерительная система прибора в непрерывном поточном режиме с частотой 10 измерений в секунду производит измерение и вычисление следующих величин: V , ΔP , λ , Re , ν и формирует их временные архивы.

Выполнены испытания действующего макета прибора на индустриальном масле и 70%-й водном растворе глицерина. Испытания проведены на гидравлическом стенде лаборатории в виде двух этапов:

- на первом этапе экспериментально была получена калибровочная зависимость для СУ прибора с использованием указанных выше рабочих жидкостей (рис.5);

- на втором этапе на этом же гидравлическом стенде в поточном режиме была измерена вязкость индустриального масла. В процессе эксперимента кинематическая вязкость масла изменялась в диапазоне $(7-28) \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ за счет изменения его температуры. Величина V в процессе эксперимента изменялась в диапазоне $(0,2-0,8) \text{ м/с}$.

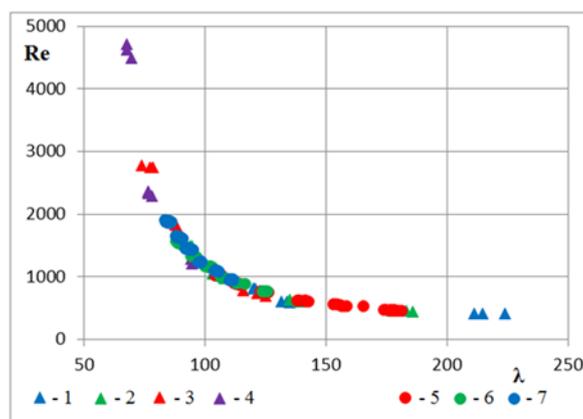


Рис. 5. Калибровочная зависимость для СУ.
1-4 – 70% раствор глицерина в воде, 5-7 – индустриальное масло

Номер	1	2	3	4	5	6	7
$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	28	20	12	7	7-17	7-17	7-17
$V, \text{ м/с}$	0,2-0,8	0,2-0,8	0,2-0,8	0,2-0,8	0,20	0,30	0,35

Измеренные значения кинематической вязкости сравнивались с эталонными значениями, соответствующими температуре индустриального масла в момент измерения вязкости.

Зависимость вязкости рабочих жидкостей от температуры была определена в специальной серии экспериментов.

Анализ погрешности полученных результатов показал, что относительная погрешность измерения кинематической вязкости индустриального масла с помощью испытанного макета прибора, не превышала величины $\pm 2\%$.



Рис. 6. Фотография испытанного образца макета прибора.

Разработаны техническая документация для производства прибора, технический паспорт, руководство по эксплуатации, методика калибровки, имеется разрешение на применение прибора во взрывоопасных зонах. На рис.6 приведена фотография испытанного образца макета прибора

Проект: «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАТИВНЫХ И ИНЖЕНЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ С ФАЗОИЗМЕНЯЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ» КОМПЛЕКСНОЙ ПРОГРАММЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СО РАН «МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИНТЕГРАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ» НА 2018-2020 ГГ. БЛОК «32.2.СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ С ФАЗОИЗМЕНЯЕМЫМИ МАТЕРИАЛАМИ, ПРОЯВЛЯЮЩИХ ЭФФЕКТЫ АККУМУЛЯЦИИ ТЕПЛА. РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКИХ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В КОМПОЗИТАХ С ФАЗОИЗМЕНЯЕМЫМИ МАТЕРИАЛАМИ И ИХ АНАЛИЗ» (Гос. рег. АААА-А18-118112690056-2)

Разработан экспериментальный стенд, который позволяет проводить исследования теплообмена в композитных фазоизменяемых материалах в широком диапазоне температур от 20 °С до 150 °С. Результаты могут быть использованы для изучения свойств новых композитов, развития физико-математических моделей, а также проверке их работоспособности.

Совместно с сотрудниками ИХТТиМ СО РАН разработан новый композитный фазоизменяемый материал на основе пористого диатомита. Проведены ис-

следования его теплоинерционных свойств. Образцы для исследований изготавливались методом виброформования из мелкозернистого диатомита Инзенского месторождения с влажностью, не превышающей 3–8% и с размером зёрен породы менее 0.14 мм. После формования диатомитовая матрица методом иммерсии насыщалась парафином.

В работе проведены экспериментальные исследования образцов и моделирование распространения в них тепла при нагреве с одной из сторон источником постоянной мощности. Расчеты проводились на основе разработанной энтальпийной модели. Для валидации физико-математической модели выполнено сравнение с результатами экспериментов и проанализировано влияние свойств композитного материала на тепловые процессы в нем. Сравнение показало хорошее согласие результатов между собой. В дальнейшем, в ходе численных исследований варьировались мощность теплового потока, диапазон температур фазовых переходов, характеристики фазоизменяемого компонента.

Анализ результатов расчетов показал, что применение фазоизменяемого компонента позволяет не только увеличить теплоаккумулирующую способность композитного материала, но и управлять тепловыми потоками. В результате появляется возможность уменьшить пиковые значения теплового потока, проходящего через материал, а также ограничить на длительное время диапазон изменения температуры материала при нагреве.

На рис.7 представлены результаты расчетов температуры на нижней и верхней грани образца с ФИМ (основные линии 1 и 2 соответственно) и образца без ФИМ (пунктирные линии 1 и 2) при нагреве нижней грани с $q = 60 \text{ Вт/м}^2$. Из рисунка следует, что для образца без ФИМ нагрев проходил примерно в 4.5 раза медленней. Вертикальные штрих-пунктирные линии I и II ограничивают временной интервал в диапазоне температур от 47 до 53⁰С, который является диапазоном фазовых переходов внутри образца.

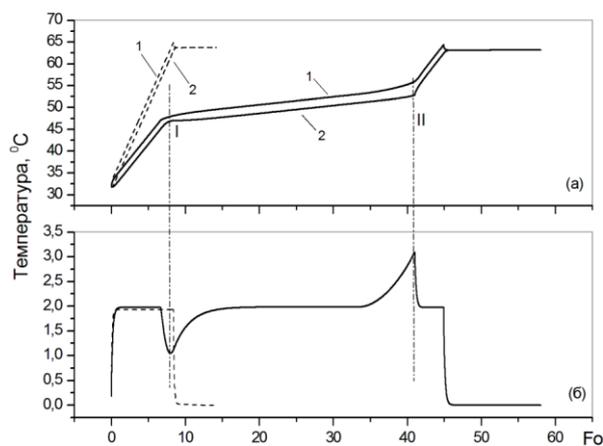


Рис.7. (а) Температура нижней (1) и верхней (2) грани образца; (б) разница температуры между нижней и верхней гранью. Пунктирная линия – образец без ФИМ, основная линия – образец с ФИМ.

Влияние фазовых превращений проявлялось в значительном снижении темпа роста температуры. После достижения образцом температуры ликвидуса $T_l = 53^\circ\text{C}$ и полного расплавления ФИМ темп нагрева образца снова становился высоким, как и на участке до линии I. На всех трех участках нагрева образца с ФИМ до отключения источника тепла рост температуры происходил практически по линейному закону. Таким образом, введение в образец ФИМ позволило за счет фазовых переходов значительно замедлить нагрев образца без снижения мощности нагрева. Необходимо отметить, что разность температуры между нижней и верхней гранями образца в случае наличия ФИМ, практически совпала с этой разностью в случае отсутствия ФИМ и составила около 2°C (рисунок 7б). Причем, она сохраняла данное значение и на участке фазовых превращений. Исключение составляли переходные участки вблизи областей начала и конца фазовых переходов, обозначенные на графике штрихпунктирными линиями I и II.

В результате моделирования процесса нагрева образцов с ФИМ при постоянном тепловом потоке выявлены следующие особенности:

время нагрева образцов с ФИМ по сравнению с нагревом образцов без ФИМ увеличивалось в 4.5 раза;

с ростом мощности теплового источника время нагрева образцов уменьшалось, однако относительная задержка времени нагрева по сравнению со случаем без учета фазовых переходов практически не изменялась и составляла величину около 5;

в поведении температуры образцов с ФИМ имеются три характерных участка: участок роста температуры до температуры солидуса начала фазовых превращений T_s , участок замедления темпа роста, связанный с фазовыми превращениями, и участок практически с прежним темпом роста температуры после завершения фазового перехода, когда температура больше температуры ликвидуса T_l . При этом на каждом участке рост температуры имел практически линейную зависимость.

Исследование влияния параметров показало, что увеличение объемного содержания ФИМ, объемной теплоемкости и числа Кутателадзе приводило к линейному росту относительного времени задержки нагрева композитного материала. В тоже время, изменение коэффициента теплопроводности в 4 раза оказывало слабое влияние на относительное время задержки.

Перечень проектов, выполняемых сотрудниками лаборатории

Проект РФФИ: **Исследование совместного тепло- и влагопереноса в новых системах утепления** (19-48-540012 p_a, рук. Низовцев М.И.)

Проект РФФИ: **Прямое преобразование энергии ветра в тепло на основе течения Куэтта-Тэйлора** (18-48-540009, рук. Назаров А.Д.)

Проект РНФ: **Турбулентный теплоперенос в вихревых потоках. Теория, эксперимент, численное моделирование** (18-19-000161, рук. Терехов В.И.)

Проект РФФИ: **Применение высокоскоростных методов исследования и разработка способов интенсификации теплообмена при спрейнном охлаждении** (18-48-540018, рук. Суртаев А.С.)

Международные связи

Выполняются работы по международному контракту с фирмами «Air Products» (США).

Связи с вузовской наукой

С Алтайским государственным техническим университетом совместная кафедра в ИТ СО РАН и проблемная лаборатория в АлтГТУ. Низовцев М.И. – заведующий совместной кафедрой теплофизических, химических и экологических проблем в энергетике, технологии и тепловых двигателях.

Назаров А.Д. – заведующий кафедрой естественно-научных дисциплин Высшего колледжа информатики Новосибирского государственного университета.

Серов А.Ф. – профессор кафедры технической теплофизика Новосибирского государственного технического университета.

Публикации

Центральные журналы – 4

Международные журналы – 17

Учебные пособия – 2

Доклады на конференциях и совещаниях

Международных – 1

в т.ч. стен. – 1

Всероссийских – 14

в т.ч. приг. – 1

секц. – 11

стен. – 2

Подготовка научных кадров высшей квалификации

Работа в научных и диссертационных советах

Низовцев М.И. – член специализированного совета по защите кандидатских и докторских диссертаций Д 003.053.01 в ИТ СО РАН; член специализированного совета по защите кандидатских и докторских диссертаций Д.212.173.02 в НГТУ, член Национального комитета по тепломассообмену РАН, член редколлегии международного журнала «Journal of Construction Research».

Серов А.Ф. – член межведомственного диссертационного совета Д.01.05.306 при Государственном университете им. К. Тынытстанова Республики Казахстан.

Подготовка отзывов на авторефераты диссертационных работ

Низовцев М.И. отзыв на автореферат диссертационной работы Башарова Марата Миннахматовича «Энергоресурсоэффективная модернизация тепломас-

сообменных аппаратов и установок в нефтехимическом комплексе», выполненной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий.

Низовцев М.И., Огородников И.А. на автореферат диссертации Клевец Ксении Николаевны «Повышение экологической безопасности объектов строительства на стадии их проектирования за счет пассивного солнечного нагрева», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.19 – экологическая безопасность строительства и городского хозяйства.

Низовцев М.И. отзыв на автореферат диссертации Кутищевой Анастасии Юрьевны «Математическое моделирование стационарных процессов электропроводности и упругой деформации в трехмерных гетерогенных средах с включениями», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Участие в совместных с вузами научно-образовательных проектах, научных исследованиях и экспериментальных разработках, а также иных совместных мероприятиях

Совместно с ВКИ НГУ (г. Новосибирск) проведение Международной научной студенческой конференции, МНСК 2019.

Совместно с НГУ (г. Новосибирск) проведение межвузовского чемпионата «Молодые профессионалы (Ворлдскиллс Россия)».

Научно-педагогическая деятельность

Проф. Серов А.Ф., НГТУ, «Разработка, планирование и обработка результатов эксперимента», «Компьютерные технологии в науке и образовании», лекции и семинары.

Проф. Сеначин П.К., АлГТУ им. И.И. Ползунова, «Двигатели внутреннего сгорания», лекции.

Назаров А.Д., ВКИ НГУ, «Разработка компьютерных систем и комплексов», лекции и семинары.

Мискив Н.Б., ВКИ НГУ, «Информационные системы в профессиональной деятельности», лекции и семинары.

Научно-исследовательская работа со студентами и аспирантами

Студентов ВКИ НГУ НГУ – 3

Аспирантов ИТ – 3

Кадровый состав

Всего сотрудников	– 20
из них научных сотрудников	– 8
в т. ч. докторов наук	– 4
кандидатов наук	– 3

Информационно-вычислительные ресурсы

Персональные ЭВМ:

Pentium – 14

Компьютеры подключены к локальной сети Института