

ТЕПЛО- ЭНЕРГЕТИКА

В номере:

- *Теплофикация в проекте новой Энергетической стратегии страны*
- *Численное прогнозирование воздействия кавитации в энергетических насосах*
- *Экспериментальное исследование свободной конвекции натрия в длинном цилиндре*

6

2015

**ООО МАИК «НАУКА/
ИНТЕРПЕРИОДИКА»**

КАМЕРА ПРОМЫШЛЕННОГО НАБЛЮДЕНИЯ

inVIZ **SNK**
inspect series



Надежная поворотная камера
для дистанционного визуального контроля цистерн и резервуаров



Водонепроницаемость
до 50 метров под водой



Устойчивость
к радиоактивному
излучению



Оптическое увеличение 40x
и цифровое увеличение 720x



Высокое разрешение
670 ТВ линий



Линейные
измерительные лазеры



Официальное представительство
viZaar industrial imaging AG
в России и странах СНГ

197022, Россия, Санкт-Петербург,
ул. Профессора Попова 37В
+7 (812) 748-28-47

info@vizaar.ru
www.vizaar.ru

КЭР-ИНЖИНИРИНГ группа компаний



КЭР
КОМПЛЕКСНОЕ
ЭНЕРГОРАЗВИТИЕ

Комплексное проектирование
в энергетике и промышленности

Комплексная автоматизация производства

Энерготехнологический аудит предприятий

Экспертиза промышленной безопасности,
диагностика и испытания

Пуско-наладка, режимная наладка,
сервисное обслуживание, ремонт энерго-
и теплотехнического оборудования, КИПиА, ОПС и др.

Производство: программно-технических комплексов,
шкафов управления, преобразователей частоты, датчиков
давления, насосных станций, технологических карт,
информационных знаков и плакатов по охране труда и др.

Повышение квалификации специалистов в области
тепловой автоматики энергопредприятий



«КЭР-Инжиниринг», группа компаний
420080, г. Казань, пр. Ямашева, 10, а/я 83
тел.: +7 (843) 557-62-05
факс: +7 (843) 557-62-07
kereng@ker-eng.com

www.ker-eng.com

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 6, 2015

Общие вопросы энергетики

- Теплофикация в проекте новой Энергетической стратегии страны
Макарова А.С., Панкрушина Т.Г., Урванцева Л.В., Хоршев А.А. 3
-

Энергосбережение, новые и возобновляемые источники энергии

- Перспективы комплексного освоения высокопараметрических геотермальных рассолов
Алхасов А.Б., Алхасова Д.А., Рамазанов А.Ш., Каспарова М.А. 11
- Численное моделирование фильтрации биогаза и теплообмена в деформируемом теле полигона твердых бытовых отходов. Ч. I. Разработка модели
Куцкий Д.В. 18
-

Паротурбинные, газотурбинные, парогазовые установки и их вспомогательное оборудование

- Численное прогнозирование воздействия кавитации в энергетических насосах
Sedlář M., Šoukal J., Krátký T., Vyroubal M. 23
-

Тепло- и массообмен, свойства рабочих тел и материалов

- Экспериментальное исследование свободной конвекции натрия в длинном цилиндре
Колесниченко И.В., Мамыкин А.Д., Павлинов А.М., Пахолков В.В., Рогожкин С.А., Фрик П.Г., Халилов Р.И., Шепелев С.Ф. 31
- Теплообмен и гидравлическое сопротивление в каналах прямоугольного сечения со скрещивающимся оребрением (обзор)
Соколов Н.П., Полищук В.Г., Андреев К.Д., Рассохин В.А., Забелин Н.А. 40
- Рекомендации по значениям и расчетным соотношениям для теплофизических и кинетических свойств жидкого свинца
Савченко И.В., Лежнин С.И., Мосунова Н.А. 51
- Интенсификация процессов парообразования с помощью поверхностно-активных веществ
Шарифуллин В.Н., Шарифуллин А.В. 55
-

Паровые котлы, энергетическое топливо, горелочные устройства и вспомогательное оборудование котлов

- Моделирование и натурные испытания вихревых плазменно-топливных систем для воспламенения высокозольного энергетического угля
Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Карпенко Ю.Е., Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А., Филимонов С.А. 59
-

Водоподготовка и водно-химический режим

- Влияние редокс-ионитов ЭИ-21 на водно-химический режим II контура транспортных ЯЭУ
Москвин Л.Н., Раков В.Т. 69
-

Металлы и вопросы прочности

Исследование причин и выявление доминирующих механизмов разрушения сильфонных компенсаторов теплофикационных трубопроводов ОАО МОЭК

Томагов Г.В., Николаев А.Э., Семенов В.Н., Шипков А.А., Шепелев С.В.

72

Поправки к статье Щинникова П.А., Сафронова А.В. “Повышение точности расчета технико-экономических показателей энергоблоков путем корректировки основных измеряемых параметров на основе согласования энергодбалансов”, опубликованной в № 12 за 2014 г.

80

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Теплофикация в проекте новой Энергетической стратегии страны

© 2015 г. Макарова А.С.¹, Панкрушина Т.Г.^{1, 2}, Урванцева Л.В.¹, Хоршев А.А.^{1, 2}

Институт энергетических исследований Российской академии наук¹ –
Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”²

e-mail: epos@eriras.ru

На основе сопоставления тенденций развития теплофикации в России и в странах со значимой ролью ТЭЦ оценена приемлемость выбранных направлений развития ТЭЦ для отдельных регионов нашей страны. Изложен разработанный ИНЭИ РАН методический подход к комплексной оценке эффективности и масштабов развития теплофикации, базирующийся на унифицированном представлении энергопотребления многих городов страны и источников их энергоснабжения и рассмотрении теплофикации в сложной взаимосвязи с остальными типами генерирующих источников и топливными отраслями. Показана принципиальная применимость данного подхода для исследования перспектив развития теплофикации с использованием оборудования разных типов, в том числе и атомных энергоблоков малой мощности. Представлены результаты использования этого методического подхода при разработке сценариев Энергетической стратегии России для определения предпочтительных областей применения и масштаба эффективного развития теплофикации в период до 2035 г. Сделан вывод о целесообразности роста мощности ТЭЦ в России и повышения их роли в системе централизованного теплоснабжения.

Ключевые слова: электроэнергетика, теплофикация, эффективность, системное исследование, математическое моделирование, тенденции развития.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ, НОВЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Перспективы комплексного освоения высокопараметрических геотермальных рассолов¹

© 2015 г. Алхасов А.Б.², Алхасова Д.А.², Рамазанов А.Ш.², Каспарова М.А.²

Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН²

e-mail: alibek_alhasov@mail.ru

Показана высокая эффективность комплексной переработки высокотемпературных гидротермальных рассолов с утилизацией тепловой энергии в бинарной ГеоЭС и последующим извлечением растворенных химических соединений. Приведены перспективные технологические схемы, где электроэнергия, вырабатываемая на бинарной ГеоЭС, используется в блоке для извлечения химических компонентов. Разработана технология комплексной переработки гидротермальных рассолов хлоридно-натриево-кальциевого типа, предусматривающая получение не только товарной продукции, но и практически всех реагентов из перерабатываемой воды, необходимых для реализации технологии. Указаны первоочередные площади для освоения, приведены предварительные оценочные показатели для Берикейского геотермального месторождения. Показано, что только разведанные запасы термальных рассолов Берикейского месторождения позволят ежегодно получать более 2000 т карбоната лития и тем самым полностью обеспечить потребности в нем промышленности России.

Ключевые слова: геотермальная энергия, бинарная геотермальная электростанция, температура, тепломассоперенос, низкокипящий рабочий агент, минерализация, извлечение, карбонат лития.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ, НОВЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Численное моделирование фильтрации биогаза и теплообмена
в деформируемом теле полигона твердых бытовых отходов.

Ч. I. Разработка модели

© 2015 г. Куцый Д.В.

Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины¹

e-mail: dkutsyi@biomass.kiev.ua

Статья посвящена исследованию параметров скважин, которые используются в составе вертикальных систем сбора биогаза для дегазации полигонов. Для этого рассмотрены подходы к моделированию основных процессов, протекающих в пористой среде полигона. На их основании разработана теплофизическая модель фильтрации биогаза и теплообмена, которая учитывает изменение гидродинамических свойств отходов вследствие их вторичного проседания. Адекватность результатов разработанной модели подтверждена данными классических работ. Также установлено влияние процесса вторичного проседания отходов на распределение давления и температуры в теле полигона. Показано, что сжатие отходов вследствие вторичного проседания приводит к увеличению давления в среднем на 40%.

Ключевые слова: биогаз, газосборная скважина, математическая модель, полигон, проседание отходов, численные методы.

ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ, ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Численное прогнозирование воздействия кавитации в энергетических насосах¹

© 2015 г. Sedlár M.², Šoukal J.², Krátký T.³, Vyroubal M.²

Центр гидравлических исследований² – Центр по изучению новейших материалов, конструкций и технологий, Технологический университет³
e-mail: m.sedlar@sigma.cz

Описываются возможности численного моделирования кавитационного потока в мощных энергетических насосах. Рассматриваются и анализируются основные виды отрицательного воздействия кавитации на функционирование таких насосов на нескольких практических примерах. Численное исследование проведено с использованием как коммерческой программы, предназначенной для моделирования течения неоднородной жидкости, так и собственного (внутрифирменного) программного обеспечения, основанного на решении уравнения Рэлея–Плессе, учитывающего процесс пузырьковой кавитации вдоль траектории движения жидкости. Кавитационные пузырьки при этом представляются как активная (непассивная) примесь, взаимодействующая с жидкостью при фазовых переходах.

Ключевые слова: кавитация, численное моделирование, насосы, эрозия, кавитационные пульсации.

**ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ**

**Экспериментальное исследование свободной конвекции натрия
в длинном цилиндре**

© 2015 г. Колесниченко И.В.¹, Мамыкин А.Д.¹, Павлинов А.М.¹, Пахолков В.В.², Рогожкин С.А.²,
Фрик П.Г.¹, Халилов Р.И.¹, Шепелев С.Ф.²

Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН¹ –
АО “Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова”²

e-mail: birbraer@okbm.nnov.ru

Согласно опыту эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах (БН), при расчетном обосновании трубопроводов и оборудования необходимо учитывать свободную конвекцию натрия в замкнутом объеме. В статье приведены результаты экспериментального исследования свободной конвекции натрия в длинном цилиндре с торцевым подводом и отводом тепла при теплоизолированной боковой цилиндрической поверхности. Диаметр заполненной натрием полости 168 мм, длина 850 мм. Выполнено детальное сравнение результатов трех экспериментов при горизонтальном, наклонном (под углом 45° к вертикали) и вертикальном положении цилиндра. Число Рэлея (рассчитанное по диаметру полости) для трех экспериментов примерно одинаково и равно 5×10^6 . Проанализирована структура возникающих крупно- и мелкомасштабных течений. Получены оценки числа Нуссельта, являющегося мерой интенсивности теплопереноса при свободной конвекции. Выявлена связь между структурой течения и числом Нуссельта.

Ключевые слова: свободная конвекция, жидкие металлы, теплопередача, турбулентность, верификация кодов.

**ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ**

Теплообмен и гидравлическое сопротивление в каналах прямоугольного сечения со скрещивающимся оребрением (обзор)

© 2015 г. Соколов Н.П., Полищук В.Г., Андреев К.Д., Рассохин В.А., Забелин Н.А.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет¹

e-mail: akostik@land.ru

Каналы со скрещивающимся оребрением находят широкое применение в трактах охлаждения лопаточных аппаратов высокотемпературных газовых турбин. В разное время во многих организациях проводились экспериментальные исследования теплообмена и гидравлического сопротивления каналов с компланарным оребрением противоположных стенок для получения полуэмпирических зависимостей критериев Нуссельта (безразмерных коэффициентов теплоотдачи) и коэффициентов сопротивления от режимного числа Рейнольдса и относительных геометрических параметров (или их комплексов). Форма опытных каналов, условия проведения экспериментов и используемые переменные выбирались таким образом, чтобы они были наиболее приспособленными для решения конкретных практических задач. Поэтому полученные при обработке опытных данных результаты имеют большой разброс и ограниченное применение. В данной статье рассмотрены результаты экспериментальных исследований различных авторов. При сравнении результатов сделаны дополнительные вычисления для приведения математических соотношений к зависимостям от одинаковых переменных. Выполнено обобщение результатов. В итоге получены универсальные соотношения для определения коэффициентов гидравлического сопротивления и чисел Нуссельта при течении рабочей среды по каналам с компланарным оребрением.

Ключевые слова: газовые турбины, системы охлаждения лопаток, компланарное оребрение, теплообмен, гидравлическое сопротивление.

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН, СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

Рекомендации по значениям и расчетным соотношениям для теплофизических и кинетических свойств жидкого свинца

© 2015 г. Савченко И.В.², Лежнин С.И.^{1,2}, Мосунова Н.А.¹

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН¹ –
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН²
e-mail: savchenko@itp.nsc.ru

В последние годы существенно возрос интерес к свойствам жидкого свинца, это связано в первую очередь с перспективой его применения в качестве теплоносителя в ядерных энергетических установках и, прежде всего, в реакторах деления тяжелых ядер быстрыми нейтронами. В настоящей работе проведен анализ опубликованных данных по теплофизическим и кинетическим свойствам свинца в жидком состоянии, на основании которого выбраны и рекомендованы соотношения для использования при проведении научных и инженерных расчетов. Представлена общая оценка состояния экспериментальных исследований теплофизических свойств жидкого свинца. Приведенное значение температуры затвердевания максимально надежно. Данные по температуре кипения, энтальпии плавления и испарения, а также давлению насыщенных паров определены с удовлетворительной точностью. Литературные данные по теплоемкости жидкого свинца существенно расходятся, поэтому рекомендуемые значения нуждаются в экспериментальной проверке и уточнении. Экспериментальные данные по поверхностному натяжению, плотности, коэффициенту объемного расширения, скорости звука, вязкости и теплопроводности имеются не во всей области температур существования жидкой фазы. Наименее изученными являются область температур выше 1200 К и область фазового перехода кристалл–жидкость. Необходимы дополнительные исследования перечисленных свойств в указанных температурных интервалах. Вопрос о влиянии примесей на теплофизические свойства свинца до сих пор остается невыясненным и требует экспериментального изучения.

Ключевые слова: свинец, теплофизические свойства, кинетические свойства, экспериментальное исследование, соотношение.

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

Интенсификация процессов парообразования
с помощью поверхностно-активных веществ

© 2015 г. Шарифуллин В.Н.¹, Шарифуллин А.В.²

Казанский государственный энергетический университет¹ – Казанский национальный исследовательский
технологический университет²

e-mail: vilen44@mail.ru

Выполнено исследование влияния группы низкомолекулярных поверхностно-активных веществ (ПАВ) на скорость парообразования при пузырьковом кипении воды. Установлено, что в электрическом котле скорость парообразования и тепловой поток от нагревателя в присутствии ПАВ увеличиваются на 4–8%. Анализ процесса на базе модели обновления поверхности контакта фаз позволил сформулировать механизм влияния рассмотренных ПАВ.

Ключевые слова: парообразование, теплообмен, интенсификация, поверхностно-активные вещества.

**ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО,
ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ**

Моделирование и натурные испытания вихревых плазменно-топливных систем для воспламенения высокосолевого энергетического угля¹

© 2015 г. Мессерле В.Е.^{2, 3, 4}, Устименко А.Б.⁴, Карпенко Ю.Е.⁵, Чернецкий М.Ю.^{2, 3},
Дектерев А.А.^{2, 3}, Филимонов С.А.²

Сибирский федеральный университет² – Институт теплофизики СО РАН³ – Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики⁴ – ООО “Отраслевой центр плазменно-энергетических технологий”⁵

e-mail: ust@physics.kz

Выполнены исследования процессов подачи пылеугольного топлива и его горения в топке котла, оснащенного вихревыми плазменно-топливными системами. Представлены результаты трехмерного моделирования процессов традиционного сжигания угля и сжигания с плазменной активацией горения в топочном пространстве. Проведены численные исследования вихревой плазменно-топливной системы с подачей аэросмеси через улиточный аппарат. Выявлена зависимость траектории закрученного потока аэросмеси в вихревой плазменно-топливной системе от угла поворота улиточного аппарата и определен оптимальный угол поворота, при котором достигается устойчивое плазменное воспламенение пылеугольного факела.

Ключевые слова: горение, пылеугольное топливо, термохимическая подготовка, плазма, топка котла, численное моделирование.

ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

Влияние редокс-ионитов ЭИ-21 на водно-химический режим II контура транспортных ЯЭУ

© 2015 г. Москвин Л.Н.¹, Раков В.Т.²

Санкт-Петербургский государственный университет¹ — Научно-исследовательский технологический институт
им. А.П. Александрова²
e-mail: foton@niti.ru

Представлены результаты испытаний водно-химического режима II контура полномасштабных наземных стендов-прототипов транспортных ядерных энергетических установок с водо-водяной и жидкометаллической реакторной установкой. Определено влияние медьсодержащих редокс-ионитов, предназначенных для химического обескислороживания конденсата пара, на водно-химический режим контура циркуляции рабочего тела. Оценка влияния редокс-ионитов на водно-химический режим выполнена на основании обобщения массива данных, полученных при расширенном контроле методами физико-химического анализа качества среды конденсатно-питательного тракта и методами металлографического анализа состояния поверхностей трубной системы дефектного парогенератора. Экспериментально определена эффективность обескислороживания штатной системы вакуумной деаэрации турбинного конденсата. На основании полученных данных о негативном влиянии медьсодержащих редокс-ионитов на водно-химический режим конденсатно-питательного тракта и достаточной эффективности штатной системы вакуумной деаэрации турбинного конденсата сформулирован отказ от применения редокс-ионитов в ионитных фильтрах конденсатоочистки. Приведены данные по длительной работе стенда-прототипа транспортной ядерной энергетической установки без химического обескислороживания турбинного конденсата.

Ключевые слова: водно-химический режим, транспортные ядерные энергетические установки, рабочее тело, обескислороживание, редокс-иониты.

DOI: 10.1134/S0040363615040074

МЕТАЛЛЫ И ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ

**Исследование причин и выявление доминирующих механизмов разрушения
сильфонных компенсаторов теплофикационных трубопроводов ОАО МОЭК**

© 2015 г. Томаров Г.В.¹, Николаев А.Э.², Семенов В.Н.¹, Шипков А.А.¹, Шепелев С.В.¹

ЗАО “Геотерм-ЭМ”¹ – ОАО МОЭК²

e-mail: geotherm@gmail.com

Представлены результаты лабораторных исследований и расчетно-аналитических работ по оценке напряженно-деформированного состояния металла элементов сильфонных компенсаторов теплофикационных трубопроводов ОАО МОЭК, подверженных коррозионному разрушению. Установлены основные причины и доминирующие механизмы повреждения сильфонных компенсаторов. Определено влияние исходных щелевых дефектов и условий эксплуатации на особенности и интенсивность развития процессов разрушения сильфонных компенсаторов, работающих в теплосетях ОАО МОЭК.

Ключевые слова: сильфонный компенсатор, теплофикация, коррозионное растрескивание металла, металлография, щелевой дефект.

Поправки

DOI: 10.1134/S0040363615060120

В статье Щинникова П.А. и Сафронова А.В. “Повышение точности расчета технико-экономических показателей энергоблоков путем корректировки основных измеряемых параметров на основе согласования энергодбалансов”, опубликованной в № 12 за 2014 г.,

на стр. 58 (левый столбец, 10-я строка снизу) фразу “количество обрабатываемых для расчетов ТЭП энергоблоков” следует читать “количество обрабатываемых для расчетов ТЭП параметров энергоблоков”;

в табл. на стр. 59 в последней строке вместо “КПД котла η_k ” надо читать “КПД энергоблока η_e ”;

в обозначении оси ординат на рис. 5 следует читать “Доля, руб/(кВт · ч)” вместо “Экономия топлива, руб/(кВт · ч)”.