

УДК 532.516

Халатов А.А.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОФИЗИКИ

ЧАСТЬ 2

Розглянуті перспективні технології в царині теплоенергетики і пов'язані з ними проблеми в галузі теплофізики.

Рассмотрены перспективные технологии в области теплоэнергетики и связанные с ними проблемы в области теплофизики.

The perspective technologies in the power engineering are considered. The associated thermal physics problems are also discussed.

Нанотехнологии в энергетике. В соответствии с данными ВТИ (Россия) возможности дальнейшего повышения КПД наиболее востребованных энергоблоков мощностью 300 МВт весьма ограничены. Они составляют 2...3 % для угольных электростанций и 6...8 % для газовых. Однако это потребует значительных финансовых инвестиций. Поэтому на данном этапе требуются принципиально новые технологии производства электрической энергии. Наряду с перспективными угольными и парогазовыми технологиями, рассмотренными выше, большие перспективы связываются с использованием достижений бурно развивающихся нанотехнологий.

Квантовая полирезонансная активация (КПРА) позволяет управлять энтропией системы на молекулярном уровне и интенсифицировать процессы горения [1]. Для возникновения КПРА необходимо, чтобы средняя энергия движения частиц окружающей среды была бы выше псевдостабильного уровня возбужденного состояния частиц, вызывающих КПРА. Для этого может быть использована теплота сгорания топлива. В качестве инициаторов КПРА используются наночастицы с низким уровнем возбуждения, и поэтому система непрерывно получает накачку за счет теплоты сгорания. Для инициации КПРА требуется очень малое количество квантовых наноактиваторов, обычно для перевода в состояние с пониженной энтропией хватает одной частицы наноактиватора на миллиард молекул пассивной среды.

При использовании жидких углеводородов применяются хорошо растворимые наноакти-

ваторы. Добавление к дизельному топливу малого количества наноактиватора (около 100 мг на тонну) вызывает снижение удельного расхода топлива на 10...15 %. Применение активаторов мазута снижает его вязкость, а при его горении происходит активация топочных газов, которая приводит к увеличению температуры факела на 100...150 °С и снижению вредных выбросов. На электростанциях, использующих газ и уголь, можно применять водный раствор наноактиватора, который инжектируется в топку или вторичный воздух. Расход наноактиватора в этом случае составляет 0,5 г на тонну угля или на 1000 м³ природного газа. Возможно также использование наноактиватора в котловой воде агрегата.

Снижение вредных выбросов в окружающую среду является одним из важных направлений угольной энергетики. Компания «Hydrocarbon Technologies» (США) с помощью нанотехнологий разработала методику предварительной обработки угля таким образом, чтобы создавать из него экологически чистое топливо с малым выбросом вредных продуктов в атмосферу [1]. Экологически чистая технология сжигания некондиционных топлив с использованием каталитических свойств наночастиц сажи предложена в России (СО РАН).

Будущее энергетики связывают с твердоокисными топливными элементами с нанокерамическими электролитами с ионной проводимостью, которые могут являться основой промышленных энергетических установок прямого преобразования химической энергии в электрическую. Такие топливные элементы

работают при температуре 800...1000 °С, они используют водород, природный газ, а также синтез-газ, полученный из природного газа или за счет газификации и конверсии угля.

Конверсия углеводородного сырья в водород является сложным и многостадийным процессом, поэтому традиционные химические реакторы имеют большие размеры и сложны в управлении. Принципиальным решением проблемы является использование мини-генераторов водорода с каналами микронного размера, которые покрыты наноструктурными катализаторами. Нанотехнологии позволяют создавать катализаторы с оптимальными характеристиками с целью повышения активности, селективности и производительности генераторов водорода. В Институте теплофизики СО РАН (Россия) созданы нанокатализаторы размером около 10 микрон на основе благородных металлов, которые характеризуются повышенной поверхностной энергией и большой абсорбционной емкостью [1]. Они использованы для получения синтез-газа при неполном окислении и паровой конверсии метана. Определены условия получения синтез-газа с высокой селективностью по водороду и окиси углерода. Значительные перспективы для прямого синтеза углеводородов из синтез-газа, а также для очистки нефти имеет использование нанокатализаторов на основе нанопорошков Fe, Ni, FeCO.

Наножи́дкости и микроканалы. Очень малые добавки наночастиц к жидкости (доли процента по объему) приводят к росту ее теплопроводности до 60 %, теплоотдачи – до 60 %, критического теплового потока – до 300 % [2]. При этом дополнительные потери давления практически отсутствуют. В качестве материалов наночастиц используются керамика (SiN), оксиды (Al_2O_3 , Fe_3O_4 , CuO), карбиды (SiC, TiC), металлы (Ag, Au, Cu, Fe), полупроводники (TiO_2), углеродные нанотрубки. Потенциальные области применения наножи́дкостей – теплоэнергетика, ядерная энергетика, радиоэлектроника, транспорт, электроника, оборонная техника, медицина, химический анализ. В на-

ножи́дкости дополнительный перенос теплоты осуществляется за счет движения наночастиц под действием силы Ван-дер-Ваальса (малые расстояния между наночастицами), электростатической силы (малые размеры наночастиц), стохастической силы (броуновское движение частиц) и гидродинамических сил [3].

Выполненные исследования показали, что вязкость наножи́дкости незначительно изменяется с температурой и концентрацией наночастиц [4]. Это является фактором, обуславливающим отсутствие дополнительных гидравлических потерь [2]. На теплопроводность наножи́дкости влияют объемная концентрация наночастиц, природа, размер и форма наночастиц, природа и температура жидкости, а также добавки инородных материалов в наножи́дкость. Аномально высокий рост (до 260 %) теплопроводности наножи́дкости на основе углеродных нанотрубок и масла обусловлен высокой теплопроводностью нанотрубок (3000 Вт/м·К) и большим отношением их длины к диаметру (~ 2000) [4, 5].

На конвективный теплообмен при течении наножи́дкости в каналах влияет большое количество факторов – скорость движения, теплопроводность, теплоемкость, концентрация, природа, размер и форма наночастиц. Несмотря на увеличение теплопроводности наножи́дкости, при ее кипении происходит ухудшение теплообмена по сравнению с кипением «чистой» жидкости [4]. Это происходит потому, что наночастицы заполняют элементы шероховатости поверхности кипения и ухудшают условия для формирования пузырьков жидкости. На шероховатой поверхности этот эффект проявляется еще сильнее. Что касается критического теплового потока, то он увеличивается до 300 %, причем наиболее заметно в области более высоких значений массового расхода. Этот факт может быть использован в ядерной энергетике.

Теплообмен и гидродинамика в микроканалах (диаметром менее 100 микрон) представляют большой интерес для новых отраслей техники (микроэнергетика, радиоэлектроника, биомедицина и др.). Для прокачки теплоноси-

теля в микроканалах необходимо приложить значительное давление, поэтому более предпочтительным является движение потока за счет совместного действия градиента давления и внешнего электрического поля, которое может «помогать» продольному градиенту давления или противодействовать ему. Как показано в работе [6], распределение температуры и скорости в микроканале зависит от отношения радиуса канала к длине Дебая, мощности внешнего источника электрического поля и параметра Φ , который пропорционален отношению движущих сил $(dP/dx)/(d\Phi/dx)$.

В целом, теплообмен и гидродинамика при течении наножидкостей в каналах только начинают развиваться и в ряде случаев полученные результаты являются противоречивыми. Особое внимание в ближайшем будущем должно быть обращено на дальнейшее изучение теплофизических свойств наносuspензий, закономерностей тепло- и массопереноса при кипении, вынужденной и свободной конвекции, кинетики и термодинамики фазовых переходов в наноструктурных материалах и объектах, а также при течении жидкости в микроканалах, в том числе при сверхзвуковом течении.

Новые источники энергии. Несмотря на высокую стоимость (до 3000 долл. США за киловатт установленной мощности), мировой рынок солнечной энергетики растет ежегодно на 40 % в год, а стоимость солнечной энергии становится дешевле примерно на 20 % в год. Предполагается, что объем рынка солнечных батарей и солнечных панелей к 2013 г. составит около 70 млрд. долл. США [2].

В настоящее время для изготовления тонкопленочных солнечных элементов широко используется микрокристаллический кремний. Но экономически выгодное соотношение стоимости и КПД является пока трудно достижимым для производителей систем фотоэлектричества. Использование нанотехнологий позволит создать более производительные, чем кремниевые, солнечные элементы, которые отличаются низкой стоимостью и более высоким КПД. Например, применение пленок

медь-индий-диселенид галлия (CIGS–пленки) позволит осуществлять «самосборку» жидкости, состоящей из наночастиц, покрывающих поверхность. Такие солнечные элементы могут быть нанесены даже на гибкую основу.

Решение проблемы прямого преобразования теплоты ядерной реакции в электричество позволит радикально изменить облик атомных электростанций. В США с использованием нанотехнологий разработан новый материал, повышающий эффективность преобразования радиоактивного излучения в электричество в несколько раз [2]. Он представляет собой множество слоев углеродных нанотрубок, наполненных золотом и окруженных гидридом лития. Радиоактивное излучение воздействует на электроны в атомах золота и заставляет их покидать свои орбиты. Электроны проходят через нанотрубки, попадают в гидрид лития, а затем движутся к электроду, создавая электрический ток. Соответствующая ориентация нанотрубок по отношению к радиоактивному излучению позволяет использовать его энергию наиболее эффективно.

Другим важным направлением прямого преобразования теплоты в электричество является термоэлектричество, которое изучается уже много лет. Недавно в США удалось преобразовать теплоту в электрический ток более эффективно, используя металлические наночастицы, соединенные с органической молекулой [2]. На каждый градус разности температур получены 8,7 мкВ разности потенциалов для бензолдитиола и 14,2 мкВ – для трибензолдитиола. Это направление может положить начало разработки принципиально новых типов наногенераторов электроэнергии.

Большие перспективы связываются с применением нанодобавок и наноприсадок к смазочным материалам (теплоэнергетика и энергомашиностроение). Металлоплакирующие и полимерные присадки при температуре 150...200 °С формируют на поверхности наноструктурные пленки с оптимальной шероховатостью. Антифрикционные и противоизносные слоистые добавки включают элементы и соеди-

нения с низким усилием сдвига между слоями. Смазки с ультрадисперсным наноразмерным графитом резко снижают трение и износ трущихся соединений. При вводе сферических фуллеренов в смазочные масла повышается износостойкость и ресурс оборудования, а введение неабразивных наноалмазов (4...6 мкм) и кластерного углерода в смеси с диэфирами и антиоксидантами позволяет «прирабатывать» трущиеся соединения агрегатов, т.е. обладают свойством самовосстановления.

Большой интерес представляет создание аккумуляторов тепловой и электрической энергии большой емкости [2]. Компания «Altair Nanotechnologies» (США) недавно объявила о создании инновационного нанотехнологического материала для электродов литий-ионных аккумуляторов. Аккумуляторы с $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ -электродами имеют время зарядки всего 10...15 минут. В 2006 г. эта компания уже начала производство аккумуляторов на своём заводе в штате Индиана.

Малогабаритные аккумуляторы теплоты большой емкости представляют интерес в жилищно-коммунальном секторе при использовании в ночное время (с 23:00 до 7:00), когда действует пониженный тариф. Особенно актуально создание аккумуляторов изотермического типа (фазовый переход, химические реакции, капиллярно-пористые эффекты), которые не теряют теплоту в окружающее пространство.

Экспериментальные методы и измерительные системы. В последние годы за рубежом сделан существенный шаг в создании современных методов экспериментирования, что позволило более глубоко понять многие теплофизические процессы. В числе новых методов диагностики потоков следует отметить метод лазерно-индуцированной флуоресценции (LIF), метод мгновенного измерения поля скоростей (PIV), лазерно-доплеровская анемометрия нового поколения (LDV), тонкопленочные датчики теплового потока.

Создание микродатчиков размером 100...125 микрон приведет к революционным изменениям в системе глобального контроля

работы энергетических установок. Это позволит осуществлять постоянный мониторинг сложных технических систем – определять локальные параметры, детектировать появление трещин, контролировать текущее состояние и своевременно прогнозировать возникновение опасных режимов. В США создан и испытывается датчик температуры размером 100 микрон, работающий в потоке с температурой до 870 °С (в стадии испытаний датчик температуры до 1200 °С) и датчик давления, работающий в потоке с температурой до 500 °С.

Одностенные нанотрубки обладают свойством ультравысокой чувствительности и могут использоваться для обнаружения определенных молекул в газовой среде или растворах. Нанодатчик для обнаружения молекул NO_2 , CO , CO_2 , H_2 и гидрокарбонатов разработан в США; в нем использованы оптические свойства наночастиц золота, встроенных в нанокompозит оксида металла.

Компьютерное моделирование. Изучение теплофизических явлений не всегда возможно экспериментальными методами. В этом случае на первое место выдвигается компьютерное моделирование теплофизических процессов, которое основано на прогрессе в области вычислительной техники, математического моделирования, теплофизики и гидрогазодинамики. За последние 20 лет за рубежом созданы коммерческие пакеты прикладных программ «FLUENT», «STAR-CD» (США), «PHOENICS» (Великобритания) и другие, получившие большое распространение в практике теплофизических исследований и проектирования энергетических установок. В Институте теплофизики СО РАН (Россия) разработан специализированный пакет компьютерных программ «σFlow» для моделирования теплофизических процессов в энергетике, в ИПМаш НАН Украины создан программный комплекс FLOWER, ориентированный на решение трехмерных задач газодинамики турбомашин.

В ИТТФ НАН Украины с использованием коммерческого пакета программ «PHOENICS» выполнен комплекс исследований термогазо-

динамики малых котлов ЖКХ и мощных энергетических котлов [7]. Численное моделирование термогазодинамики котла НИИСТУ-5 (рис. 1) позволило сформулировать предложения по защите задней стенки котла при интеграции в объем длиннопламенной горелки. Это дало возможность существенно повысить КПД

котла и снизить расход потребляемого газа. Численное моделирование термогазодинамики энергетического котла ТПП-312А Ладыжинской ТЭС (Украина) позволило определить его основные характеристики (рис. 2) и наметить конструктивные мероприятия по снижению выбросов окислов азота в атмосферу.

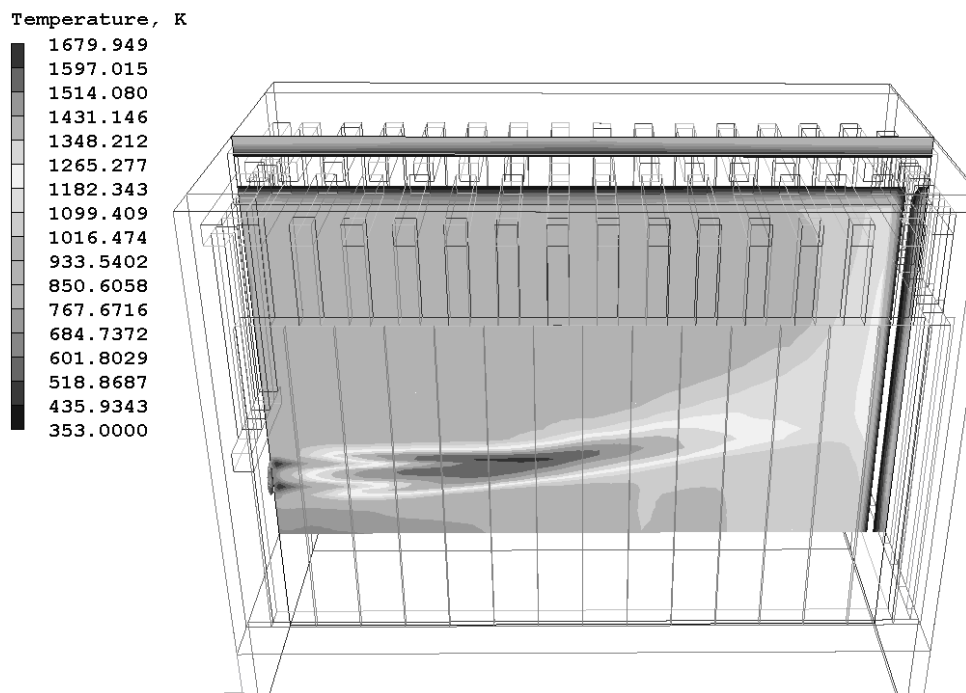


Рис. 1. Распределение температуры в объеме котла НИИСТУ-5 при 50 % нагрузке.

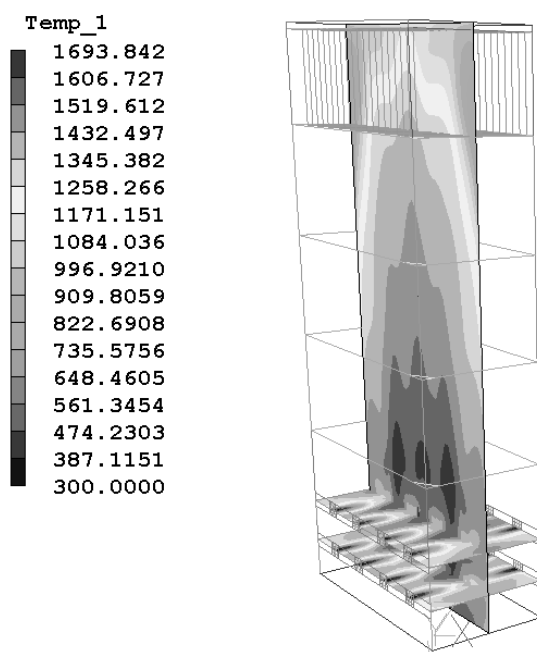


Рис. 2. Распределение температуры в объеме котла ТПП-312А Ладыжинской ТЭС [7].

Выполненные расчеты показали, что современные компьютерные технологии обладают широкими возможностями в области проектирования и модернизации котлов и камер сгорания. Они позволяют проанализировать большое количество вариантов конструкции и режимов эксплуатации на стадии создания конструкции или до ее модернизации, что позволяет принять более обоснованное решение, существенно сэкономить время, материальные и финансовые ресурсы. Компьютерное моделирование позволяет также обнаружить некоторые локальные особенности термодинамики огневого пространства, которые трудно определяются в эксперименте.

Заключение

Украина является промышленно развитой страной, но в значительной степени зависит от импорта энергоносителей. Поэтому совершенствование энергетики и, прежде всего, внедрение передовых энергосберегающих технологий является главной задачей, как ближайшего периода, так и далекого будущего. Большой интерес представляют «чистые» угольные технологии, такие как водоугольное топливо, беспламенное сжигание топлива, использование угля микронного помола, эффективные технологии извлечения CO_2 из топочных газов, экологическая обработка угля до сжигания и его сжигание в чистом кислороде. Интересно направление, связанное с созданием паровых турбин с температурой пара перед турбиной до $1500\text{ }^\circ\text{C}$ за счет дополнительного сжигания водорода в кислороде перед турбиной, развитие технологий газификации и пиролиза угля. Украина пока недостаточно развивает парогазовую технологию, которая широко используется в мире, но имеет все основания для ее ускоренного развития.

Украина имеет развитую газотранспортную систему, поэтому очень важными являются проблемы повышения экономичности и надежности газотурбинных двигателей и нагнетателей в целом, утилизация «выбросной» теплоты за газовыми турбинами. Несомненный интерес представляют новые направления –

наноактиваторы горения, топливные элементы, наножидкости и микроканалы, методы прямого преобразования радиоактивного излучения и теплоты в электричество, малогабаритные аккумуляторы тепловой и электрической энергии большой емкости.

Как показано выше, для решения этих задач предстоит выполнить большой объем научно-исследовательских работ и решить ряд исключительно трудных научных проблем в области теплофизики, которая является теоретическим фундаментом всех перспективных энергетических технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев С.В.* Теплофизические основы новых энергетических технологий.– <http://www.sibai.ru/content/view/1498/1653/>.
2. *Халатов А.А., Долинский А.А.* Нанотехнологии в энергетике и проблемы теплофизики // Промышленная теплотехника. – 2010. – № 4. – Т. 32. – С. 5-14.
3. *Wang L., Wei X.* Nanofluids: Synthesis, Heat Conduction, and Extension // Journal of Heat Transfer.-March 2009. – 131. –2006. – P. 1-7.
4. *Das S., Choi U., Patel H.* Heat Transfer in Nanofluids – A Review // Heat Transfer Engineering. – 2006. – 27. – № 10. P. 1-19.
5. *Liang Liao, Zhen-Hua Liu.* Forced Convective Flow Drag and Heat Transfer Characteristics of Carbon Nanotube Suspensions in a Horizontal Small Tube // Heat Mass Transfer. – 45. – 2009. – P. 1129-1136.
6. *Maynes D., Webb B.* Fully-Developed Thermal Transport in Combined Pressure and Electro-Osmotically Driven Flow in Microchannels // Journal Heat Transfer. – 125 / – October 2003. P. 889-915.
7. *Халатов А.А., Кобзар С.Г., Головатюк П.М., Березницький О.О.* Застосування методів комп'ютерного моделювання при розробці заходів з реконструкції енергоблоків теплоелектростанцій // Енергетика та електрифікація. – 2008. – № 6. С. 48-55.

Получено 13.10.2010 г.