

Тепло и свет нашему дому

© С. В. Алексеенко, 2018

В 2018 г. автор этой статьи, известный новосибирский ученый-теплофизик, академик РАН С. В. Алексеенко, стал одним из двух лауреатов ежегодно присуждаемой международной премии «Глобальная энергия». Формулировка обоснования для награждения этой престижной научной премией – «за вклад в развитие теплоэнергетики, теплообмена и повышение ресурсного потенциала человечества». За этими громкими словами в данном случае стоят конкретные фундаментальные и практические работы по созданию современных энергосберегающих технологий и экологически безопасных энергетических установок. Многие из них базируются на вихревых процессах, которые позволяют повысить эффективность сжигания органического топлива, что в наши дни является общемировой проблемой

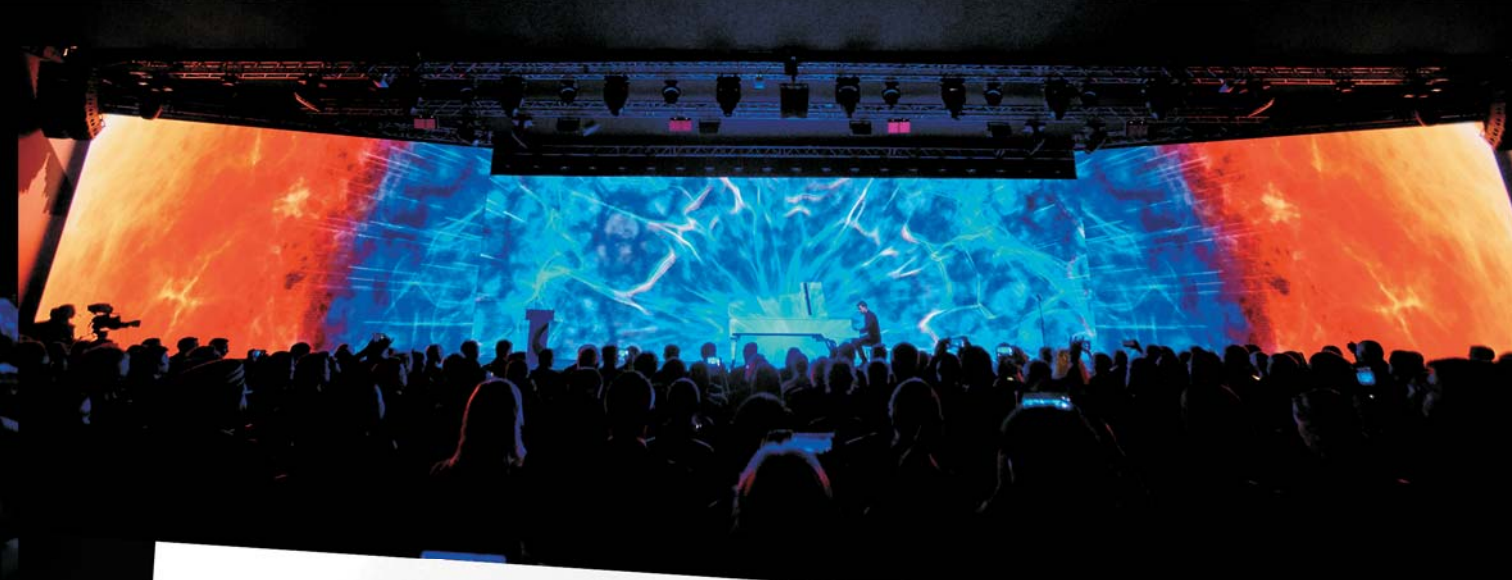
Пылеугольный факел на испытательном стенде ИТ СО РАН. Фото Е. Бутакова

АЛЕКСЕЕНКО Сергей Владимирович – академик РАН, заведующий лабораторией проблем тепломассопереноса Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (Новосибирск); в 1997–2017 гг. занимал пост директора института. Заведующий кафедрой физики неравновесных процессов физического факультета Новосибирского государственного университета. Председатель Объединенного ученого совета по энергетике, машиностроению, механике и процессам управления СО РАН, главный редактор журнала «Теплофизика и аэромеханика». Лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники (2012), международной Премии им. академика А. В. Лыкова (2014), международной премии «Глобальная энергия» (2018). Автор и соавтор более 300 научных работ, включая 8 монографий и 38 патентов

Все мы знаем, что неисчерпаемыми источниками энергии являются возобновляемые ресурсы: энергия солнца, ветра и воды, энергетические ресурсы биомассы, геотермальная энергия – природное тепло Земли. Среди самых перспективных направлений – солнечная энергетика: даже в средней полосе в ясный день на 1 м^2 поверхности падает энергетический поток мощностью до 1 кВт. Не менее значима *петротермальная энергетика*, базирующаяся на аккумулировании «сухого» тепла горячих горных пород на глубинах 3–10 км, где температура достигает $350 \text{ }^\circ\text{C}$. Такой энергии человеческой цивилизации должно хватить практически навсегда!

Ключевые слова: теплофизика, энергетика, энергосбережение, возобновляемые источники энергии, тепломассообмен, вихри, волны, пленки жидкости, турбулентные струи, пламя, горение.

Key words: thermophysics, power engineering, energy saving, renewable energy sources, heat and mass transfer, vortex, waves, liquid film flows, turbulent jets, flame, combustion



Одна из самых престижных научных премий «Глобальная энергия», которой отмечаются выдающиеся достижения в области энергетики, принесшие пользу всему человечеству, была учреждена в ноябре 2002 г. по инициативе группы российских ученых. Учредители премии – российские компании ПАО «Газпром», ПАО «ФСК ЕЭС» и ОАО «Сургутнефтегаз». Решение о награждении принимает международный комитет, куда входят специалисты в области энергетики из России, Великобритании, Германии, Китая, США, Франции и др. Размер премиального фонда в 2018 г. составил 39 млн рублей. К 2018 г. лауреатами стали 37 ученых из десяти стран мира, в том числе 18 российских, включая академиков А. Э. Конторовича, В. Е. Накорякова и В. Н. Пармона из Сибирского отделения РАН

На торжественной церемонии награждения премией «Глобальная энергия» в октябре 2018 г. *Справа* – лауреаты, российский академик С. В. Алексеенко и австралийский профессор М. Грин. *Вверху* – лауреаты премии прошлых лет академики РАН В. Е. Пармон, А. Э. Конторович и Г. А. Месяц. Фото из архива пресс-службы ассоциации «Глобальная энергия»

И все-таки пока в мировом масштабе все работы по возобновляемым источникам энергии – это деятельность на достаточно далекую перспективу. До середины, а может быть, и до конца нашего столетия основное внимание в области энергетики будет направлено на повышение эффективности сжигания и переработки невозобновляемого ископаемого органического топлива – газа, нефти, угля.

Некоторые подходы, используемые здесь, вполне очевидны. К примеру, сегодня КПД производства электрической энергии на газовых станциях составляет 30–35%. Но благодаря использованию парогазовых установок, где генерация электричества сначала идет в газовой турбине за счет сжигания газа, а потом в паровой надстройке, КПД можно повысить почти вдвое. В угольной энергетике наиболее перспективна глубокая переработка сырья, в первую очередь, его *газификация* – получение горючего *синтез-газа* (водород + CO) для промышленности и энергетики, а также высокоэффективное сжигание угля. Первым направлением в мире занимаются немногие: сегодня основной упор



Добавление водяного пара позволяет экологически чисто сжигать низкокачественные жидкие топлива и горючие отходы типа отработанных масел. Принцип действия прямоточной горелки оригинальной конструкции, разработанной в ИТ СО РАН (Новосибирск), в том, что сначала при недостатке кислорода происходит газификация органического топлива с образованием синтез-газа, который на выходе из горелки смешивается с окружающим воздухом и сжигается с низким уровнем вредных выбросов, прежде всего окислов азота и сажи. На основе этого подхода разработаны автономные источники тепла мощностью до 50 кВт. *Вверху* – характерный сажный режим горения дизельного топлива; *справа* – сжигание топлива в струе перегретого водяного пара.
Фото И. Ануфриева (ИТ СО РАН)



делается на эффективные и экологически чистые методы сжигания твердого органического топлива.

России глупо отказываться от использования ископаемого топлива: мы владеем громадными ресурсами такого сырья – 18% запасов угля (2 место в мире), около 6% нефти (6–8 место) и 18% природного газа (1 место). И до конца нынешнего века оно, очевидно, будет основным.

Что касается Сибири, то здесь доля угля в энергобалансе составляет более 80%. Еще один нюанс: в холодном сибирском регионе большая часть энергии идет на производство тепла, тогда как в большинстве стран приоритет отдается производству электричества как такового. С этой точки зрения нам нет особого смысла заниматься повышением КПД электрических станций – важнее коэффициент использования топлива. Пусть даже КПД при производстве электроэнергии будет очень низким (к примеру, 20%), но если все остальное будет эффективно превращено в тепло, то это и будет достижением.

Как поднять КПД?

Современные тенденции в теплоэнергетике связаны с ужесточением экологических требований. Считается, что в *парниковом эффекте*, способствующем глобальному потеплению, в первую очередь виноват углекислый газ, который выбрасывается в атмосферу при сжигании органического топлива. В 2016 г. в соответствии с Рамочной конвенцией ООН об изменении климата было подписано Парижское соглашение, регулирующее меры по снижению антропогенных выбросов углекислого газа в атмосферу. Россия его пока не ратифицировала, но, вероятно, такое решение будет вскоре принято.

Что может представлять собой теплоэнергетика без выброса CO_2 ? Существуют такие радикальные меры, как *секвестирование* – улавливание двуокиси углерода и закачка его глубоко под землю в слои пористых пород или в угольный пласт, истощенные месторождения газа и нефти (что, кстати сказать, повышает нефтеотдачу). Чтобы легче было выделить углекислый газ из газовой смеси, топливо следует сжигать в чистом кислороде. Тогда в топочных газах на выходе будут присутствовать только CO_2 и пары воды, а эту смесь легко разделить путем конденсации водяного пара.

Можно извлекать CO_2 и химическим способом. Но все эти технологии очень дорогие и нерентабельные, пока их отработывают только на пилотных стендах. Сейчас основным подходом к уменьшению выбросов углекислого газа служит повышение КПД. Если, к примеру, с помощью той же парогазовой установки повысить КПД с 35 до 60%, то это будет означать, что для производства того же количества энергии вы потратите

в два раза меньше топлива и в два раза снизите выброс оксида углерода.

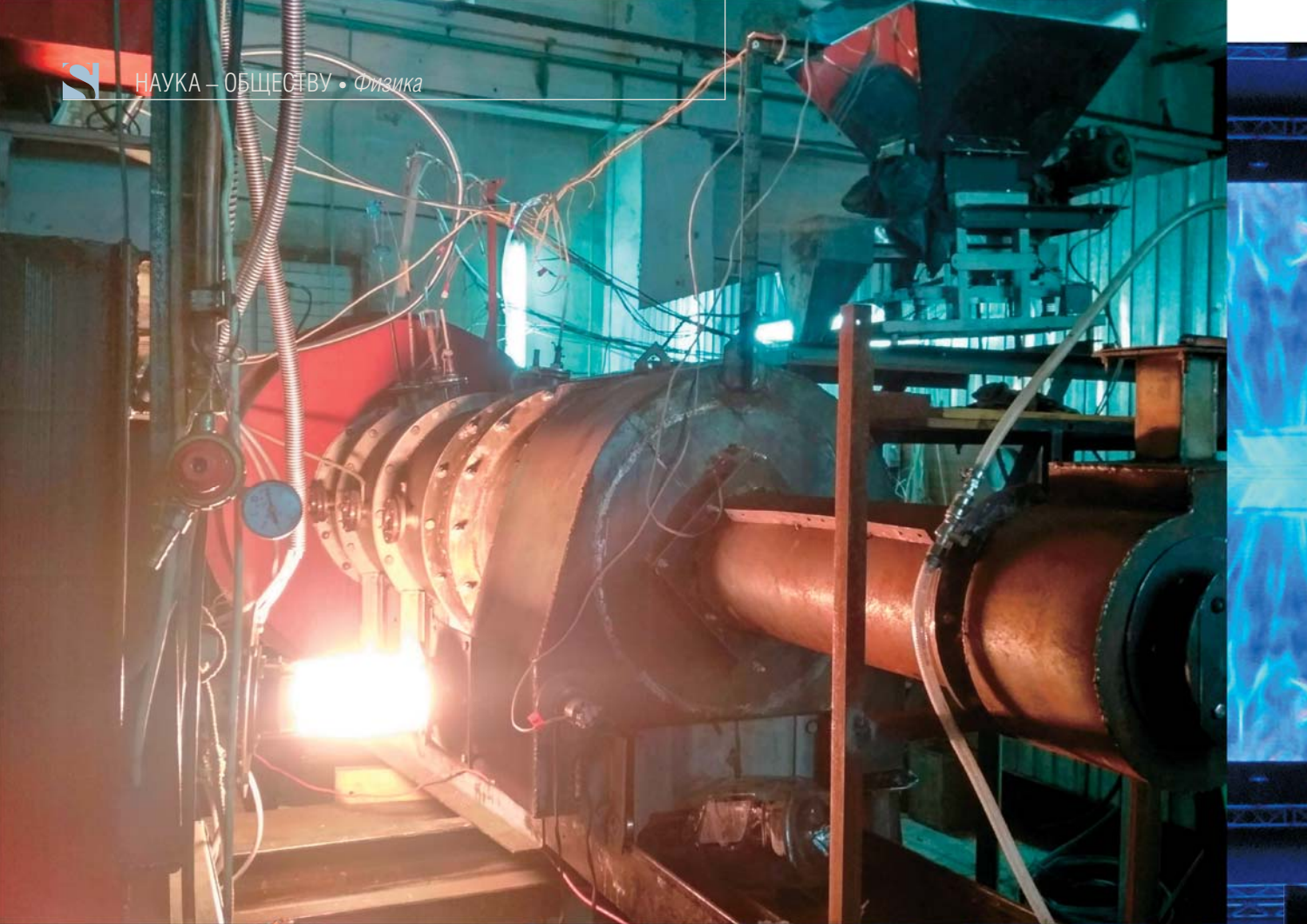
Повышение термического КПД паротурбинного цикла сейчас осуществляется путем увеличения температуры и давления пара вплоть до *сверхкритических* параметров: 25 МПа, 565 °С. И уже идет создание мощных угольных ТЭС с температурой пара 600–700 °С и давлением до 35 МПа, КПД которых достигает 47–55%. Такие параметры считаются уже *суперсверхкритическими*.

Заметим, что проблема в реализации подобных проектов связана с конструкционными материалами, которые не выдерживают столь высоких температур. Дело в том, что обычно основная тепловая нагрузка приходится на парожидкостный тракт камеры сгорания. Большой коллектив специалистов из ряда организаций (Научно-производственного внедренческого предприятия «Турбокон» (Калуга), Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана, Московского энергетического института, Института вычислительных технологий и Института теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН) предложил и выполнил проект, согласно которому повышать температуру следует не в самой топочной камере, а непосредственно перед паровой турбиной.

Для этого в атмосфере пара нужно сжигать водород с кислородом – в результате вновь получается вода, а температуру при этом можно легко довести до 800–1500 °С (!) с потенциальным КПД установки до 50–55%. Для угольного котла можно создать замкнутый цикл: сначала путем газификации получить синтез-газ, извлечь из него водород и использовать его при сжигании топлива – все это можно осуществить на одной станции. Сама идея замечательная, но проблема в том, что это опять дорого, да к тому же и опасно. Гигантский котел с водородом – это уже бомба.

Более практичные решения в этой области имеются для малой энергетики. В качестве отступления замечу, что централизованная энергетика – это великое достижение СССР и России. В нашей стране имеется самая разветвленная трубопроводная сеть теплоснабжения. Однако потери в подобных системах достигают 40%: если труба тянется на несколько километров, то никакая теплоизоляция не предохранит от потерь тепла. Поэтому сейчас в России развивается децентрализованная, или *распределенная энергетика*, основанная на локальных энергоисточниках небольшой мощности (малые котлы, возобновляемые источники энергии и даже аккумуляторы в случае небольших потребностей).

Оригинальные технологии в этом направлении успешно развиваются в нашем Институте теплофизики СО РАН совместно с промышленными партнерами. Ниже мы обсудим две из них: *микроуголь* и *водоугольное топливо* (ВУТ), смесь угля (65%) с водой.



Модифицированный экспериментальный тепловой стенд 5 МВт в ИТ СО РАН с двухступенчатой подачей угольного топлива, где исследуются процессы воспламенения, горения и газификации угля микропомола. Такая схема работы позволяет существенно сократить расходы на приготвление микроугля и число растопочных горелок, поскольку на вторую ступень топливо от штатной мельницы котла подается с учетом реакционных свойств угля. В результате мощность растопочной горелки можно увеличить в несколько раз по сравнению с одноступенчатым сжиганием. Фото Е. Бутакова (ИТ СО РАН)

Большая выгода малого угля

Идея, которую в нашем институте разрабатывает небольшая группа исследователей с главным идеологом профессором А. П. Бурдуковым, на первый взгляд, проста. Стандартный размер частиц угля, сжигаемых в крупных энергетических котлах, составляет примерно 100 мкм. Мы же предлагаем сжигать уголь в виде частиц размером менее 40 мкм (технически реально до 6 мкм), называя его углем микропомола, или микроуглем.

Когда заходит разговор о микроугле, энергетики-практики обычно выражают глубокое сомнение: во-первых, это энергозатратно, во-вторых, взрывоопасно. Но все эти проблемы решены. Для производства микроугля применяются специальные мельницы-дезинтеграторы, в которых уголь попадает между цилиндрическими «пальцами» двух дисков,

вращающихся в разные стороны с относительной скоростью 6000 об./мин. Этот процесс требует небольших затрат энергии, сравнимых с помолом в шаровых барабанных мельницах, при котором получают гораздо более крупные частицы. А чтобы избежать взрыва, микроуголь не надо запасать: его следует производить непосредственно рядом с горелкой – когда нет хранилища, нет и опасности взрыва.

Наконец, самое главное: при измельчении в дезинтеграторах идет *механоактивация*, т. е. изменение не только механических, но и физико-химических свойств самого угля. Температура воспламенения механоактивированного угля ниже, а скорость химических реакций существенно выше, благодаря чему он горит как газ или жидкое топливо. Это означает, что его можно использовать как замену в малых газомазутных котлах, которыми оснащены котельные в отдельных районах

и поселках. Уголь стандартного помола в таких котлах просто не успеет полностью сгореть, «уйдет» в сажу. А мазут – это еще и самое дорогое топливо. Так что микроуголь выгоднее не только «экологически», но и экономически.

Микроуголь можно успешно применять и в большой энергетике. Российские угли низкого качества, при этом у нас не принято проводить обогащение угля, как это делается в других странах. А чтобы запустить большой котел с таким углем, его требуется разжечь с помощью газа либо мазута, или поддерживать горение непрерывно. Все это достаточно дорого и неудобно, так как требует целого отдельного хозяйства, к тому же мазут зимой превращается буквально в камень и сам требует разогрева перед использованием. В нашем институте на основе лабораторных исследований была разработана и запатентована система по применению микроугля для поджига угольного топлива в крупных котлах, успешно

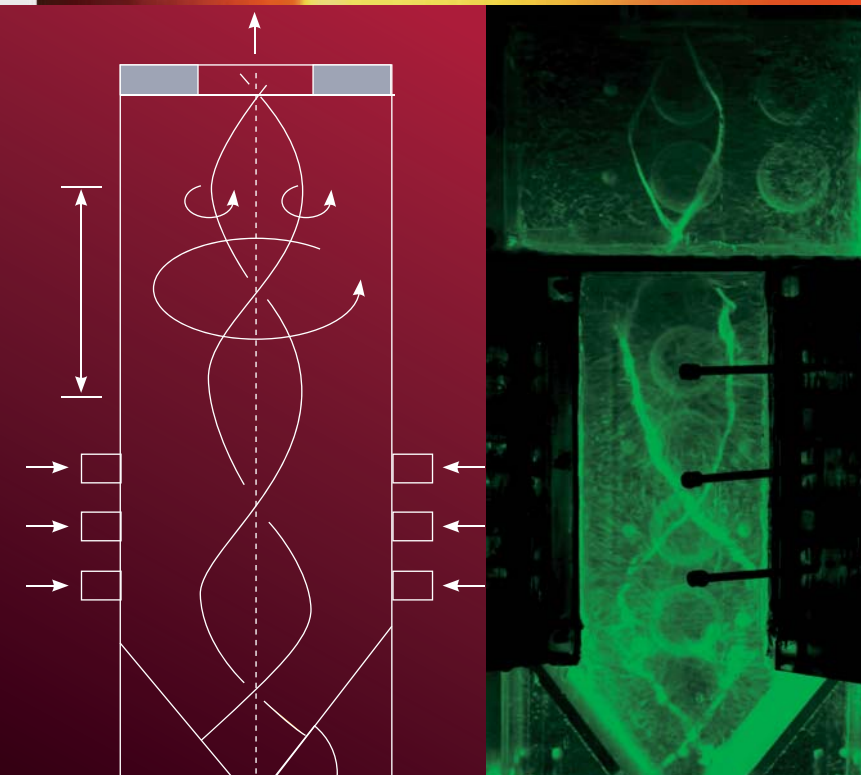
апробированная на Беловской ГРЭС (Кемеровская обл.). Сейчас она полностью готова для широкомасштабного внедрения.

Еще одно возможное, хотя и необычное, применение микроугля – непосредственное сжигание в газовых турбинах. Угольную пыль стандартного помола нельзя использовать, потому что в условиях высоких температур и скоростей массивные частицы за счет инерции попадают на поверхность лопаток турбины, мгновенно приводя их в негодность за счет эрозионного износа и коррозии. Но, как показали эксперименты, частицы угля размером около 6 мкм следуют за потоком, не касаясь лопаток и не вызывая негативных последствий.

Как уже говорилось, из угля методом газификации можно получить синтез-газ, который затем сжигается в газовой турбине, но его производство требует довольно много энергии. Так что благодаря микроуглю у нас появляется

В реальной вихревой камере сгорания, предназначенной для сжигания угольной пыли, горение происходит в потоке воздуха. Но только водяная модель (справа) позволяет наглядно увидеть структуру вихревого движения и разработать методы управления процессом сжигания. Визуализация выполняется с помощью мелких пузырьков воздуха, которые собираются на оси вихря, где всегда формируется зона пониженного давления. На схеме показан впервые обнаруженный в 1980-х гг. необычный режим вихревого движения – двойной спиральный вихрь (Alekseenko, Kuibin, Okulov, Shitork, 1999).

Фото Е. Гешевой (ИТ СО РАН)



возможность не только заменить дорогой газ на более дешевое топливо, но и повысить КПД установок, работающих на угле, исключив энергозатратный блок предварительной газификации.

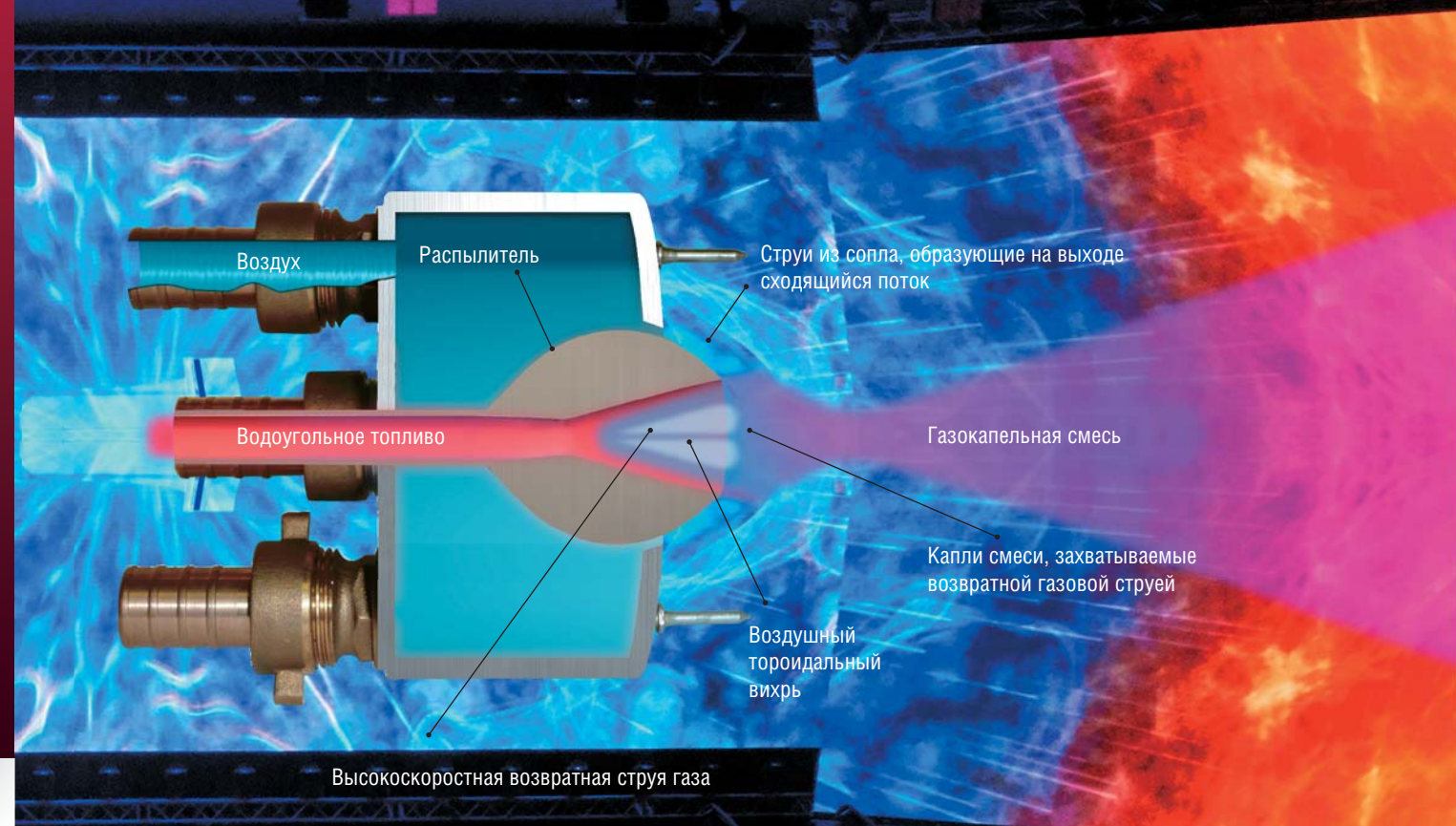
Мочить уголь – это хорошо

История водоугольного топлива началась в СССР еще в 1950-х гг. с работ профессора Г. Н. Делягина, который занимался созданием методов производства и сжигания водных суспензий углей. Он предложил не перевозить уголь по железной дороге, а гнать по трубопроводу как жидкое топливо. ТЭЦ-5 в Новосибирске была спроектирована именно под сжигание ВУТ, и к ней протянули углепровод из Кемеровской области длиной почти 220 км.

Однако из этой затеи тогда ничего не вышло: водоугольная смесь, истекающая из форсунок со скоростью более 200 м/сек, – это мощный абразив, который быстро (в течение 17 ч.) выводил из строя форсунки за счет интенсивного эрозионного



Одна из парогенерирующих установок малой мощности на водоугольном топливе успешно работает на заводе стеновых блоков (СИБИТе) в Новосибирске. Водоугольное топливо и воздух подаются в топку котла по трубопроводам в автоматическом режиме. Рядом с установкой – д. т. н. Л. И. Мальцев (ИТ СО РАН). Фото М. Роговой



В оригинальной форсунке для сжигания водоугольного топлива смесь угля с водой движется с небольшой скоростью по центральному каналу, а воздух подается через кольцевой канал и истекает из щелевого сопла с околосвуковой (300 м/с) скоростью. Благодаря сферической форме насадки и действию эффекта Коанда («эффекта чайника») образуется воздушная струя, которая «прилипает» к стенке. Соединяясь на оси центрального канала, эта пристенная струя формирует высокоинтенсивную кумулятивную струю, которая движется навстречу струе водоугольного топлива, разбивая его и смешивая с воздухом в тороидальном вихре. В результате топливо распыляется и хорошо перемешивается с воздухом, причем это происходит за пределами форсунки, что исключает эрозию ее стенок. По: (Мальцев, 2009)

износа. Было сделано предложение использовать износостойкую керамику, но в стране началась перестройка, и все эти проекты были забыты. Тематику закрыли, углепровод выкопали, а ТЭЦ-5 перешла на простой уголь. Зато соседи из КНР учли наш опыт по приготовлению и сжиганию ВУТ и сейчас ежегодно производят до 15 млн т водоугольного топлива. Его сжигают на обычных ТЭС в адаптированных котлах, а также поставляют танкерами в Японию, где уголь высушивают и сжигают стандартными способами.

К водоугольному топливу мы вернулись уже позже, сначала – по просьбе новосибирского завода СИБИТ. У предприятия были проблемы с энергоснабжением, а оборудование для производства сибита подходило и для приготовления водоугольной суспензии. В результате нам удалось создать новую концепцию подготовки и сжигания такого угля и получить более 20 патентов!

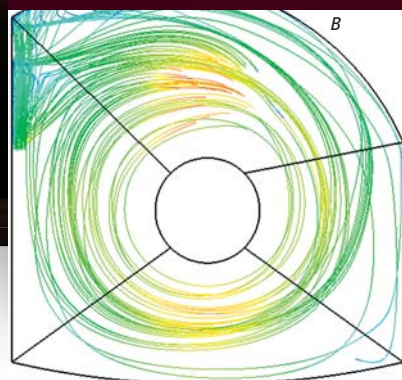
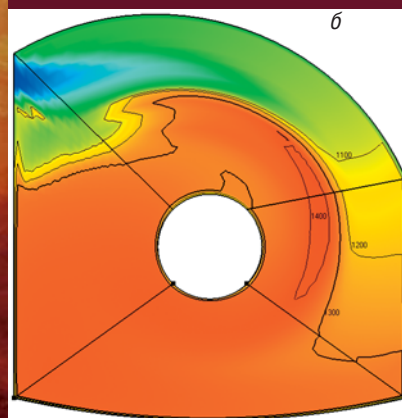
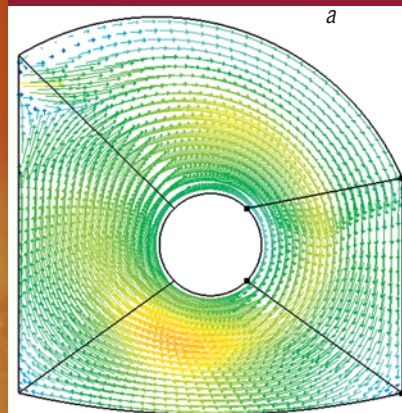
Мы отказались от углепровода и предложили готовить ВУТ в заводских условиях, а потом развозить его, как жидкое топливо, на специальных автомобилях. Уголь измельчается в мокром состоянии в шаровой

барabanной мельнице с последующим доизмельчением на гидродинамическом роторном генераторе кавитации. Кавитация – это процесс образования паровых пузырьков в потоке жидкости в зонах пониженного давления за движущимися объектами. Как только паровой пузырь перемещается в зону высокого давления, он схлопывается, при этом вследствие кумулятивных эффектов развиваются гигантские давления. В гидроэнергетике подобные явления приводят к катастрофическим последствиям, разрушая лопасти гидротурбин. В случае же с ВУТ они дают положительный эффект, измельчая и механоактивируя в воде частички угля. В смесь также добавляется специальный пластификатор (менее 1%) для уменьшения вязкости и повышения стабильности, благодаря чему водоугольная суспензия в течение месяца не расслаивается, и ее можно сжигать без предварительного перемешивания.

Важной частью новой технологии стала форсунка для смешения топлива с воздухом, которая практически не подвержена износу. Ее секрет в том, что водоугольная суспензия подается не вместе с воздухом через один

В вихревой камере котла для сжигания водоугольного топлива благодаря тангенциальному вводу смеси топлива с воздухом через форсунку формируется интенсивное вихревое движение с хорошим перемешиванием и теплообменом. В центральной части камеры имеется массивное тело, которое, с одной стороны, способствует организации закрученного течения, а с другой – облегчает повторный запуск котла за счет своей нагретой поверхности. Горячие продукты сгорания из вихревой камеры обтекают трубы, по которым проходит вода для систем теплоснабжения

Горение водоугольного топлива (ВУТ) в топке котла

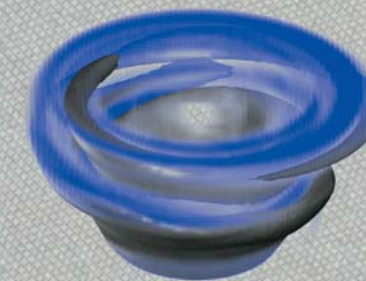
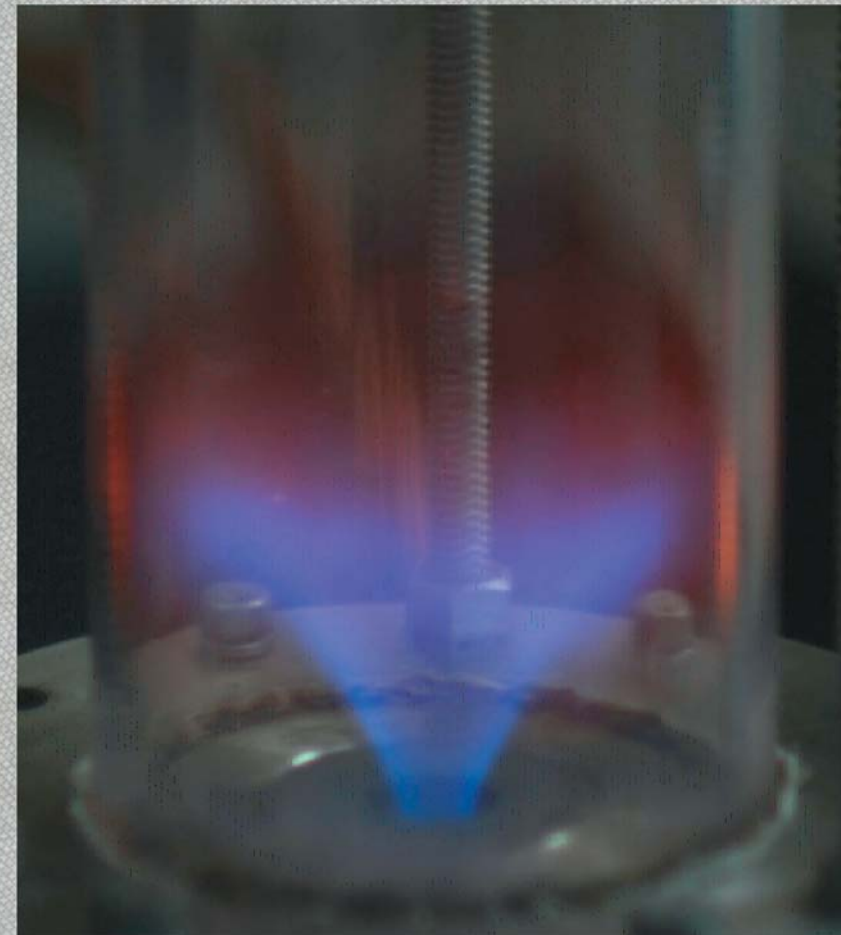


Результаты расчета вихревой топочной камеры с расходом водоугольного топлива 1500 кг в час: векторное поле скорости в центральном сечении (а), поле температур в центральном сечении (б), траектория движения водоугольных частиц (в).
По: (Чернецкий, Дектерев, Мальцев, Тэпфер, 2009)

канал, как в предыдущих конструкциях, а отдельно. Через центральный канал движется ВУТ с небольшой (всего лишь несколько м/с) скоростью, а высокоскоростной (300 м/с) поток воздуха поступает в кольцевой канал. Смешение же этих потоков происходит за пределами форсунки благодаря профилированной насадке, которая формирует мощные тороидальные вихри за счет эффектов Коанда и кумуляции.

Отметим, что в любой системе, где требуется ускорить тепло- и массообмен, даже при перемешивании, например, чая, лучшим способом достижения результата является вихреобразование. В нашем случае формирование вихрей происходит почти на всех стадиях реализации технологии ВУТ. Вихревые явления используются при подготовке смеси угля и воды к сжиганию, как уже было показано. Вихревой принцип заложен и в конструкцию топочной камеры для сжигания ВУТ, которая содержит кольцевой канал с интенсивно закрученным потоком горячей водоугольной смеси, а также центральное тело, имеющее высокую теплоемкость, что

на стр. 48



Когерентная структура пульсаций скорости соответствует прецессии двух винтовых вихрей, примыкающих к фронту пламени



Повышение эффективности газотурбинной техники нового поколения сопряжено с использованием методов избирательного управления потоками. С использованием математических методов анализа больших массивов данных и алгоритмов распознавания образов была установлена пространственная трехмерная структура автоколебательной моды, возникающей в вихревых камерах сгорания. На этой основе была разработана стратегия эффективного управления горением методами внешнего воздействия, получившая подтверждение в эксперименте (Алексеевко, Маркович, Дулин и др., 2013)

ВИХРИ В МИКРО- И МАКРОМАСШТАБЕ

Вихревые технологии для энергетики крайне важны. Мы уже упоминали вихревые реакторы, вихревые горелки... Вот еще один пример из этой области. Как известно, хорошо горят только достаточно богатые топливные смеси. Но для стехиометрической горючей смеси это означает и самые высокие температуры, и самые большие выбросы оксида азота. Поэтому главная тенденция в теплоэнергетике – использовать обедненные смеси, которые горят при более низких температурах, в результате чего, соответственно, резко снижается образование оксидов азота. Однако пламя в этом случае становится неустойчивым, оно может срываться (затухать). Один из основных способов

борьбы с этим явлением – закрутка пламени, что позволяет добиться эффективного сжигания обедненной смеси. При сильной закрутке происходит распад вихря, возникает возвратная зона, в результате горячие газы из топки поступают к корню факела, тем самым обеспечивая устойчивое воспламенение. Исследования таких процессов для нас – в числе приоритетных. Ряд удивительных и неизвестных ранее вихревых явлений мы обнаружили при моделировании течения в отсасывающей трубе за гидротурбиной. Они характерны для концентрированных вихрей типа торнадо, в которых энергия вращательного движения сосредоточена вблизи оси вихря. Так, при исследованиях неустойчивого спирального

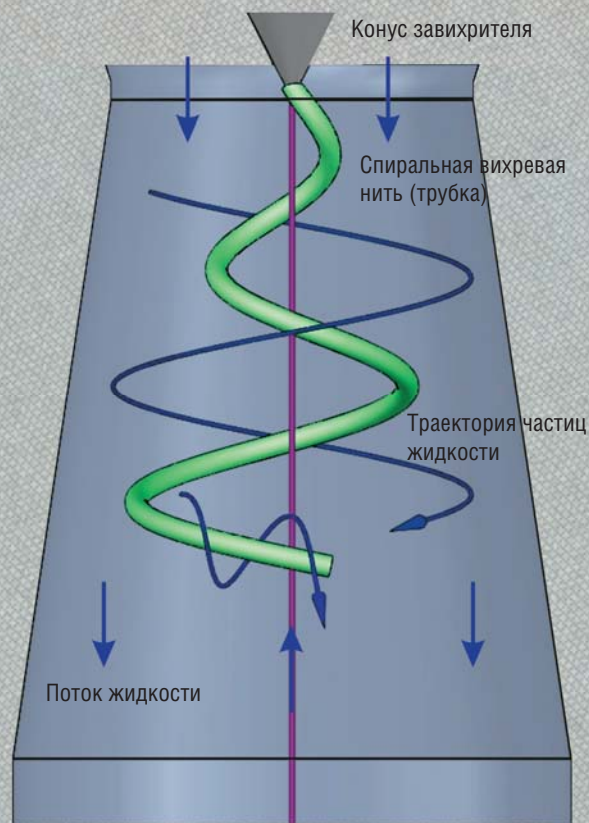
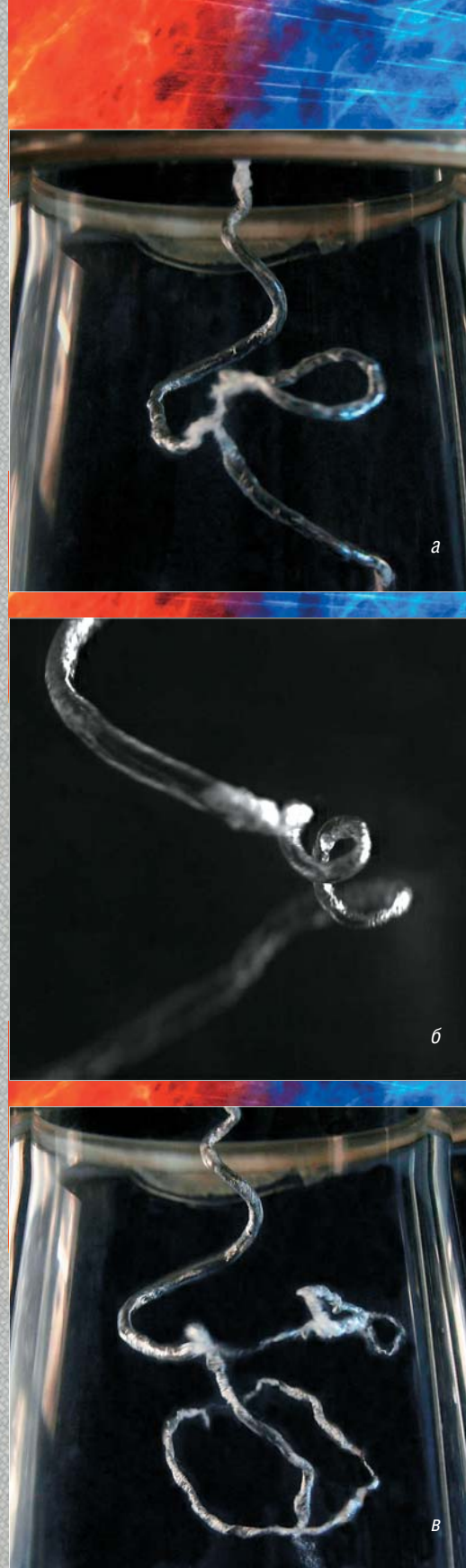
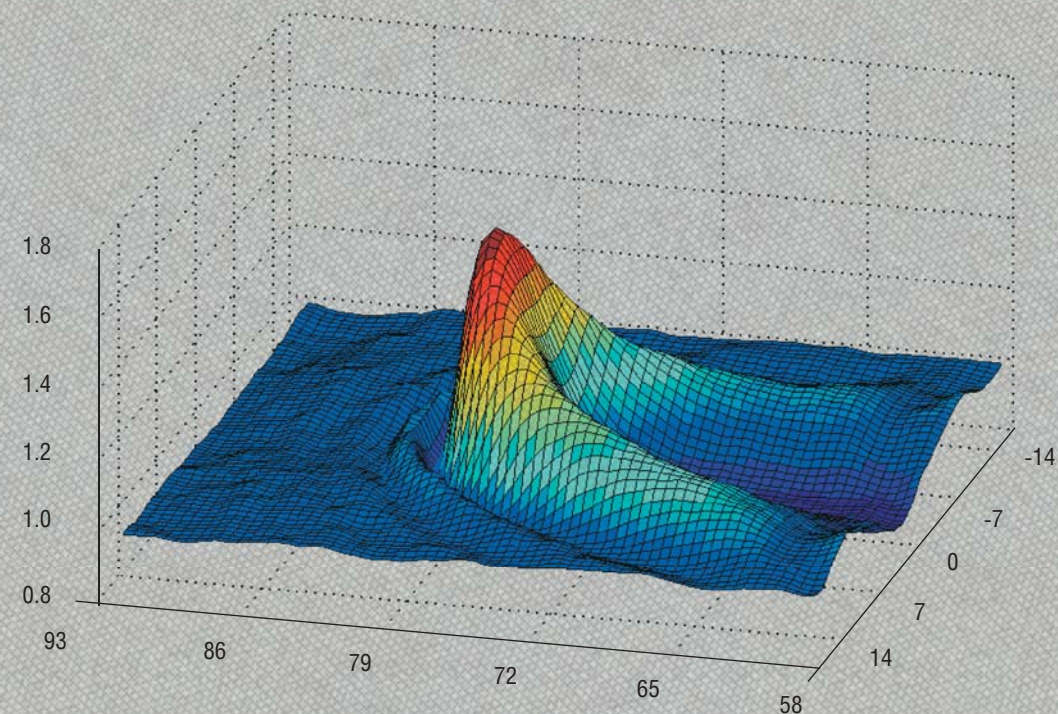


Схема экспериментальной установки для моделирования условий, возникающих в отсасывающей конусной трубе, расположенной непосредственно за гидротурбиной гидроэлектростанции. При пониженных (неоптимальных) расходах воды через турбину в трубе формируется интенсивный вращающийся спиральный вихрь – источник мощных пульсаций давления. В такой экспериментальной установке впервые были обнаружены явления, связанные с вихревым перезамыканием (Алексеевко, Куйбин, Шторк и др., 2016).

Справа – примеры вихревых структур (визуализация осуществляется пузырьками воздуха в потоке воды): а – вихревое перезамыкание с образованием изолированного вихревого кольца. Показан момент отрыва кольца, исходная вихревая нить остается непрерывной; б – формирование волны Кельвина (спиральной волны) после отрыва вихревого кольца. Волна распространяется вверх по потоку, одновременно вращаясь вокруг своей оси; в – вихревое перезамыкание с одновременным образованием изолированного и зацепленного (в нижней части фотографии) вихревых колец. Уникальное явление – образовавшееся вихревое кольцо – оказывается надетым на исходный вихрь



Фотографии – стоп-кадры видеозаписи С. Скрипкина и М. Цоя (ИТ СО РАН, Новосибирск)



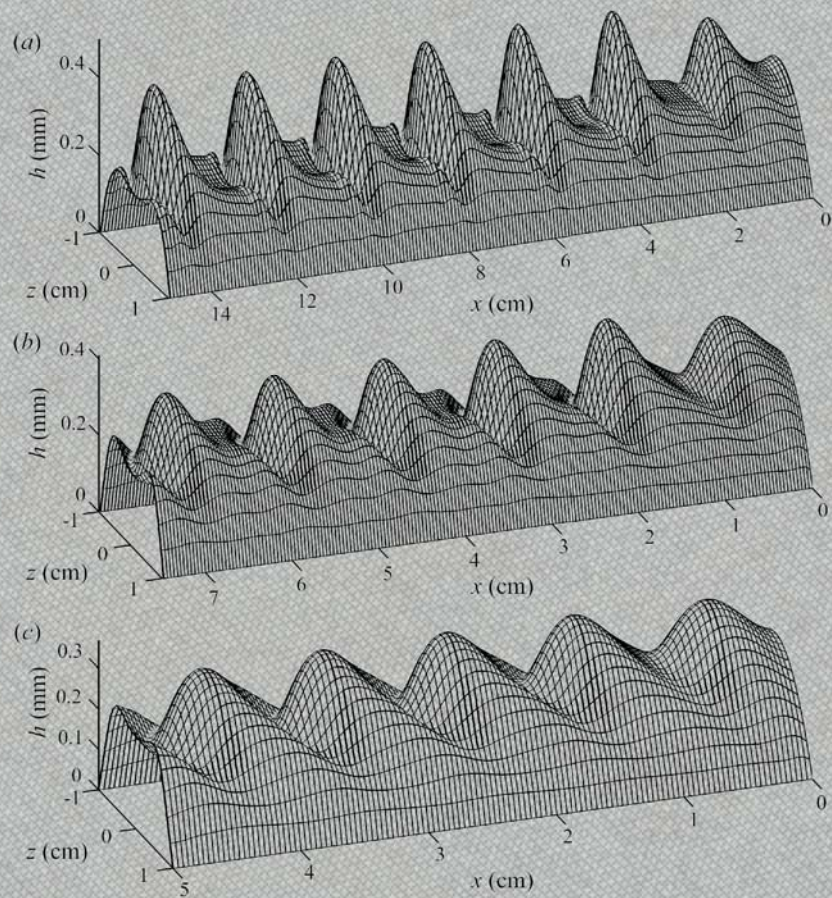
вихревого жгута, который формируется при неоптимальных для гидротурбины режимах течения, были открыты уникальные явления *перезамыкания вихря*. Наиболее часто наблюдалась ситуация, когда две части вихревого жгута в пределах одного витка спирали подходили достаточно близко друг к другу, выстраиваясь рядом таким образом, что их векторы завихренности были антипараллельны, и соединялись. Затем от этой вихревой нити отрывалось вихревое кольцо, сама же нить оставалась непрерывной. Самопроизвольно двигаясь, кольцо быстро удалялось от вихря, взаимодействуя со стенкой трубы и порождая глухие стуки, которые ранее не находили объяснения. В более редком случае соединялись не ближние, а дальние участки вихря, и получившееся вихревое кольцо не отрывалось, а оказывалось «надетым» на непрерывную вихревую нить.

Учитывать все эти явления необходимо, так как нестационарные процессы в отсасывающей трубе гидротурбины вызывают мощные вибрации, которые могут приводить к авариям, как это случилось на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 г.

Стекающие тонкие пленки жидкости широко распространены как в природе, так и в технике (например, они возникают при конденсации пара в тепловых электростанциях, в теплообменниках). Пленки всегда неустойчивы: на их поверхности формируется сложная картина волн, которые сильно влияют на процессы тепломассопереноса. С помощью метода лазерной индуцированной флуоресценции удалось выделить и описать главный элемент волновой картины – 3D-солитон (вверху), трехмерную уединенную нелинейную волну, распространяющуюся с постоянной скоростью. По: (Alekseenko, Antipin, Guzanov et al., 2005)

Мы наблюдали взаимодействия вихрей, сопровождающиеся эффектами перезамыкания, в масштабах лабораторных установок и промышленных объектов. Но подобные явления можно найти и в природе, как в микро-, так и в макромире. Существуют такие понятия, как *квантовый вихрь* и *квантовая турбулентность*. Диаметр квантового вихря – один атом, такие вихри возникают в сверхтекучем гелии. Там так же, как в вязкой жидкости, образуется турбулентное движение, но только вследствие процессов перезамыкания квантовых вихрей. И хотя наблюдать эти процессы невероятно сложно, их существование было подтверждено в нескольких экспериментальных работах (Paoletti et al., 2010; Fonda et al., 2014). Кстати сказать, поведение квантовых вихрей во многом схоже с поведением вихрей в реальной жидкости, где эксперименты с перезамыканием несравненно проще и нагляднее.

Мы сталкиваемся с концентрированными вихрями и в космическом масштабе. До сих пор нет внятного ответа на вопрос, почему наша Вселенная так однородна, по крайней мере в масштабах галактических скоплений. Одно из объяснений этого феномена уводит нас к процессам, которые шли на самой ранней стадии зарождения мира, когда Вселенная находилась в состоянии квантовой турбулентности. Представление ее изначально в виде одной вихревой трубки наподобие смерча («worm-hole cosmos») допускает неограниченный рост числа степеней свободы за счет перезамыканий. При дальнейшей эволюции на поверхности



равномерно распределенных в пространстве трубок формировалась материя, давшая начало звездам и скоплениям галактик.

Перезамыкание в интенсивных концентрированных вихрях приводит к усиленному перемешиванию, что крайне благоприятно для любых энергетических процессов. Заметим, что аналогичные явления характерны и для Солнца. Солнечные вспышки – это результат взаимодействия магнитных трубок, которые описываются теми же уравнениями, что и вихревые. Такие трубки образуются в недрах Солнца и всплывают на его поверхность; за счет неустойчивости они деформируются, образуются петли. На сильно искривленной трубке ее участки подходят близко друг к другу, происходит быстрое перезамыкание и отрыв вихревого кольца, а в месте перезамыкания возникает мощное возмущение – та самая солнечная вспышка, которая определяет солнечную активность и оказывает сильное влияние на земной климат.

Сегодня мы можем описывать поведение магнитных трубок, генерацию возмущений, явления перезамыкания и их связь с солнечными вспышками. А это означает, что мы также можем исследовать их влияние на атмосферу Земли. Недавно в Сибирском отделении РАН была организована рабочая группа под руководством академика В. Н. Пармона, которая займется изучением комплексного влияния на климат ряда факторов, включая антропогенные выбросы углекислого газа и солнечную активность

Ривулеты (ручейки) – это тонкие слои жидкости, ограниченные контактными линиями. Как и пленки жидкости, ривулеты часто встречаются в природе и в технике. Когда пленка распадается на ривулеты, это крайне негативно сказывается на эффективности теплообменников, поскольку на осушенной поверхности прекращается теплообмен. Как и пленки, ривулеты неустойчивы, на них образуются трехмерные подковообразные волны. Формы таких волн будут зависеть от их частоты (слева).

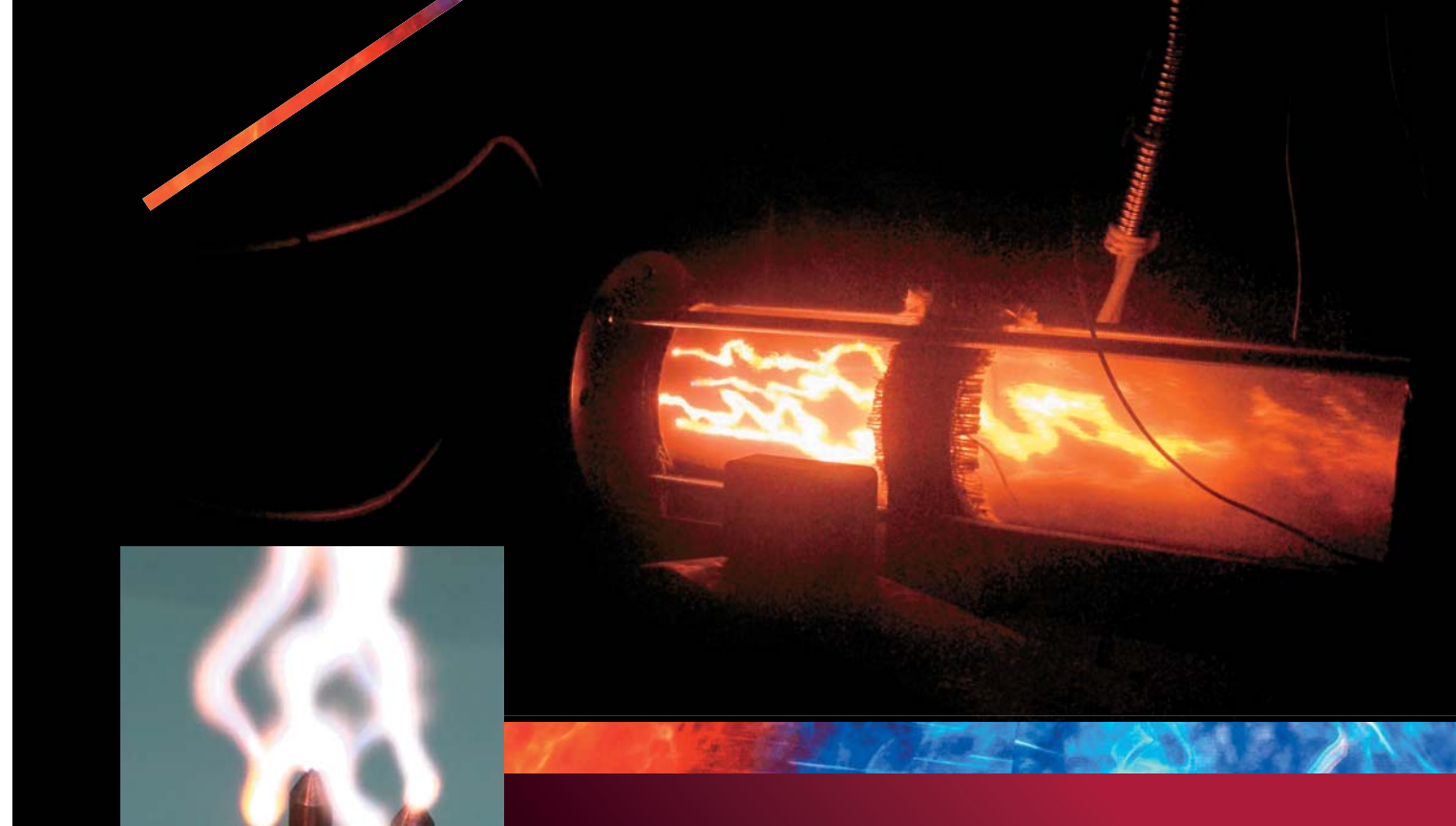
По: (Alekseenko, Aktershev, Bobilev et al., 2015)

способствует быстрому повторному запуску топочной камеры.

Разработанную технологию мы опробовали сначала на заводе СИ-БИТ, а позднее, доработав конструкцию, за счет личных (!) средств построили двухмегаваттный котел в одном из поселков Кемеровской области, где и провели испытания на жидких отходах углеобогащения (кеках), хранящихся в отстойниках многие годы. Вообще подобные отходы – это «головная боль» мировой угольной промышленности, но мы доказали, что они могут быть успешно переработаны с использованием нашей технологии.

Нашелся и бизнесмен, с помощью которого построен уже десятимегаваттный котел. Такой агрегат предлагается в качестве базового котла для малой энергетики и ЖКХ – технология готова для широкомасштабного внедрения.

Конечно, при использовании водоугольного топлива за счет испарения воды КПД (по тепловой энергии) снижается на 3–4% по сравнению со сжиганием обычного угля. Но это не принципиально, так как гарантированный КПД водоугольных котлов составляет около



Высокочастотное электрохимическое запальное устройство, созданное в ИТ СО РАН, генерирует высокочастотные холодные плазменные дуги, способствующие воспламенению топлива и ускорению термохимических превращений. Его можно использовать для растопки и поддержания горения котельных агрегатов, применяющих твердое топливо и углеродосодержащие отходы. Сейчас такими запальными устройствами оснащаются котлы ТЭЦ-10 (филиала ПАО «Иркутскэнерго»). Фото Е. Бутакова (ИТ СО РАН)

85%, к тому же они обладают улучшенными экологическими и эксплуатационными показателями. Если же говорить о всех десятках тысяч котлов, которые сегодня работают в России, то их средний КПД равен всего 20–40%! Таким образом, благодаря технологии ВУТ мы не только научились перерабатывать угольные отходы, но и создали типовой объект малой распределенной энергетики, что очень актуально для нашей страны с ее огромными малозаселенными территориями.

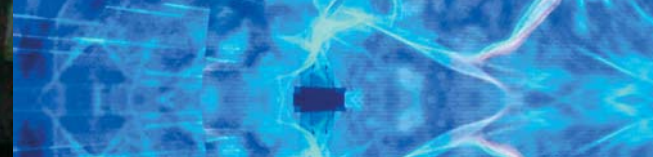
Неиссякаемое тепло глубин

Как я уже говорил, пока для нашей страны вопрос № 1 – это эффективное и экологически безопасное использование ископаемого органического топлива. Но и возобновляемые источники энергии мы не сбрасываем со счетов. К примеру, геотермальную энергию, которая делится на энергию приповерхностных теплых вод (запасов такой энергии немного) и глубинное тепло, идущее из ядра Земли, о чем уже говорилось ранее. Наш институт уже многие годы занимается проблемой

использования энергии геотермальной воды. В случае высоких температур и придумывать ничего не надо – обычный паросиловой термодинамический цикл на воде.

Но при температуре воды в диапазоне 70–160 °С требуются паросиловые установки с бинарными циклами. В таком цикле участвуют два рабочих тела: нагретая вода из-под земли и фреон или сжиженный газ с более низкой температурой кипения. В теплообменнике горячая геотермальная вода выпаривает рабочую жидкость, пары которой и вращают турбину. Здесь уже нужна другая турбина, нужно подбирать теплоносители. И хотя тепловой КПД при этом будет не очень высоким (всего лишь 10–12%), вы получите дешевую и экологически чистую энергию, без всяких выбросов CO₂.

Первая в мире Паратунская геотермальная электростанция бинарного цикла мощностью 600 кВт была запущена на Камчатке в конце 1967 г. благодаря специалистам нашего института С. С. Кутателадзе и Л. М. Розенфельду, которые получили авторское свидетельство на извлечение электроэнергии из воды с температурой



Лучший на сегодня угольный котел, созданный в Германии в 2014 г., имеет сверхкритические параметры (давление 29,2 МПа, температуру 600–620 °С) и КПД 47,5%. В России есть давний опыт эксплуатации небольших котлов с давлением 30 МПа и температурой 650 °С: подобные установки разрабатывались в московском Всероссийском теплотехническом институте (ВТИ) с 1949 г., а также в Кашире – с 1963 г. Есть и новые отечественные проекты подобных котлов. Так, ВТИ совместно с российской машиностроительной компанией «ЗМАльянс» разработал установку со сверхкритическими параметрами (давлением 29,4 МПа, температурой 610 °С) и КПД 45%. Этому же институту принадлежит проект установки с ультрасверхкритическими параметрами: давлением 35 МПа, температурой 720 °С и мощностью 800 МВт! К сожалению, на сегодня планов по строительству таких объектов в нашей стране нет, хотя они лежат в русле основной мировой тенденции развития теплотехники

Фото М. Роговой

выше 70 °С. Эта технология была использована как прототип при создании всех современных бинарных ГеоЭС в разных странах мира. Сегодня в России нет, к сожалению, ни одной действующей бинарной станции. Недавно на Паужетской ГеоЭС на Камчатке был сооружен новый бинарный энергоблок на фреоне R-134a мощностью 2,5 МВт, но он еще не запущен в эксплуатацию.

Чтобы отработать все режимы для таких электростанций, нужно иметь опытные установки. Ведь если в обычной теплотехнике единственным рабочим телом служит вода, то здесь их имеется великое множество, с совершенно разными свойствами и стоимостью: различные фреоны, перфторуглероды, сжиженные газы (изопропан, изобутан и т.д.). Нужно проводить соответствующие исследования, но возможностей для этого у нас пока нет.

Что касается глубинного тепла, то его поступление к поверхности земли на первый взгляд крайне мало (всего десятые доли Вт/м²), но зато это постоянный источник. Да и способ добычи петротермальной энергии достаточно прост: бурятся две скважины – по одной подается холодная вода, по другой выходит либо горячая вода, либо пар. Проблема в том, что породы между этими двумя скважинами должны быть проницаемыми, но на больших глубинах находятся преимущественно базальты без какой-либо заметной проницаемости.

Впервые о глубинном тепле заговорил еще знаменитый ученый-самоучка К. Э. Циолковский, который в 1897 г. нарисовал схемы со скважинами глубиной до 4 км. Позднее писатель и геолог В. А. Обручев не только написал на эту тему известный роман, но и выполнил конкретные технические расчеты по извлечению глубинного тепла. И все же годом рождения петротермальной энергетики следует считать 1970-й, когда Лос-Аламосская национальная лаборатория (США) предложила способ создания проницаемых пород путем гидроразрыва.

Согласно этому методу, которым пользуются все нефтяники, вода закачивается под давлением, в два раза большим, чем гидростатическое. С точки зрения техники это все выполнимо, но в результате может образоваться лишь одна трещина с зазором менее 1 мм, и теплообмен будет совершенно недостаточен для энергетических целей. Чтобы решить проблему, используют различные методы для увеличения проницаемости. К примеру, пульсациями давления расширяют дефекты в породах, а затем с помощью *проппанта* (гранулообразного материала) заполняют и фиксируют получившиеся трещинки.

Еще одна проблема – высокая стоимость глубинного бурения. К примеру, пробурить скважину глубиной 10 км обойдется в 2 млрд рублей, да при этом еще можно «промазать» и не попасть в нужное место. Нельзя также

забывать, что срок жизни таких скважин ограничен: породы остывают, и тепло начинает поступать слишком медленно. Скважина же должна эксплуатироваться не менее 25 лет, чтобы быть окупаемой.

На сегодня в мире имеется около 20 опытных петротермальных систем, доказана техническая возможность извлечения тепла с глубин до 5 км. Коммерческая же станция пока всего одна – в США, мощность ее всего 1,7 МВт.

Что же касается запасов доступного для извлечения глубинного тепла, то для США при нынешнем энергопотреблении их должно хватить на 50 тыс. лет, тогда как запасов традиционного органического топлива – всего на несколько сотен лет. О многом говорят и другие цифры: к 2030 г. в США нормированная себестоимость производства 1 кВт·ч электроэнергии из природного газа будет составлять 7,5 центов, а с учетом требования по секвестированию CO₂ – 10 центов. Себестоимость же 1 кВт·ч геотермальной энергии на основе горячей воды будет равна 4,8 цента, а петротермальной энергии – 6 центов, т.е. заметно ниже, чем из самого дешевого вида топлива на сегодня.

Неудивительно, что США имеют в отношении петротермальной энергетики самые серьезные намерения: по планам, к 2050 г. установленная мощность таких станций должна составить 100 ГВт, или 10% мощности всех электрических станций страны. В пересчете на Россию эта цифра возросла бы до 40%. Почти половина всей «электрической мощности» страны – это уже не фантастика.

Таким образом, можно утверждать, что петротермальной энергии достаточно, чтобы практически навсегда (!) обеспечить человечество энергией, и что петротермальная энергетика – наиболее перспективное и экологически чистое направление развития мировой энергетики. Поэтому мы предлагаем для осуществления интеграционный проект по оценке геотермальных ресурсов России, по результатам которого следует дать рекомендации по развитию энергетики на геотермальной воде и переходу на петротермальные источники.

Сейчас мы проводим расчеты, подбирая экономически выгодные режимы для развития у нас петротермальной энергетики. Вероятно, наиболее целесообразно создать одну-две опытные станции, на которых отработать технологию извлечения глубинного тепла. Как член Совета по приоритетному направлению «Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии», созданного в рамках Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации на 2018–2025 гг., я активно продвигаю эти предложения.

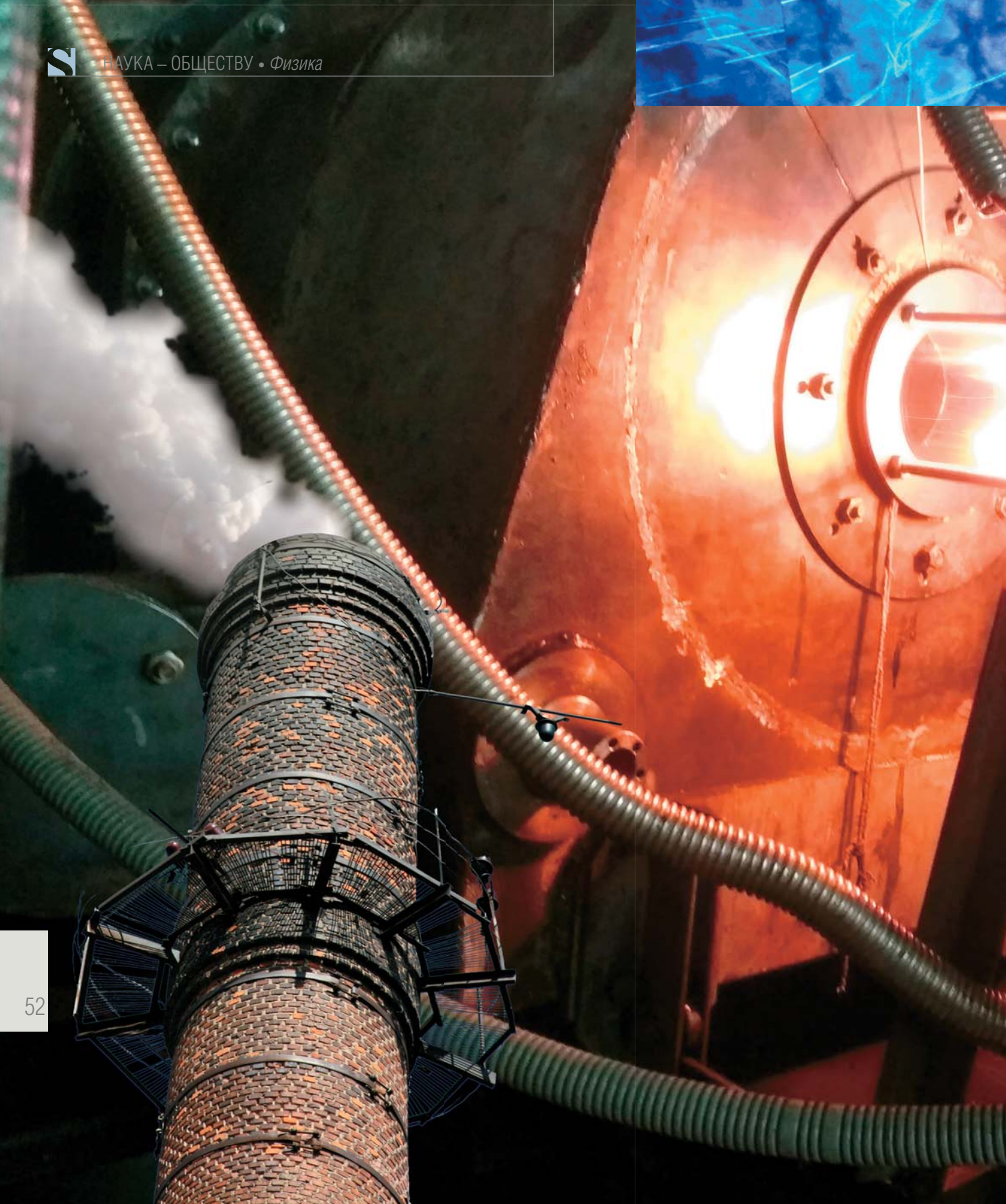


Фото Е. Бутакова и М. Роговой

Когда я говорю о новых технологиях в теплотехнике, я представляю академический институт. Цикл работ, который был удостоен престижной премии, касается теплофизических основ создания современного энергосберегающего оборудования. Именно основ, а не производства, хочу подчеркнуть. Мы можем заниматься научным сопровождением при разработке и производстве коммерческого образца, но производить его – это не наше дело.

В доперестроечные времена все было планомерно: академические и отраслевые институты, конструкторские бюро получали технологическое задание, которое выполнялось, а результаты использовались уже в другом месте. Теперь, кроме академических институтов и рынка, у нас ничего не осталось, и, к огромному сожалению, связи между ними практически нет.

Как будет выглядеть «энергия будущего» или, как принято сейчас говорить, новая энергетическая парадигма? В ней найдут себе место самые разные виды энергии, но у каждой страны будут свои подходы к их использованию, свой путь. К примеру, мировой лидер по ветроэнергетике – это Дания, потому что энергия ветра там является основным энергоресурсом. В Исландии ветер замещают горячие подземные воды, и 90% местных зданий отапливается за счет геотермального тепла, а исландцы лидируют в геотермальной энергетике.

Что мы имеем на сегодня? В 2003 г. вклад возобновляемых источников энергии в производство электрической энергии в мире составлял около 2%, а за последние 15 лет он вырос в пять раз! Колоссальный рост, который сдерживается лишь относительной дороговизной возобновляемых источников. Но и эта проблема решается.

Так, мой австралийский коллега и лауреат премии «Глобальная энергия» 2018 г. М. Грин разработал относительно дешевые и эффективные солнечные элементы PERC из микрокристаллического кремния. На их тыльную сторону нанесен диэлектрический слой с отражающими свойствами, благодаря чему можно преобразовать в электрическую энергию 23,6% падающего на элемент солнечного света – это настоящий мировой рекорд среди кремниевых солнечных батарей. Оборот бизнеса установок с элементами, созданными по технологии PERC, уже достиг миллиарда долларов. Это пример не только научного, но и коммерческого успеха.

Со своими запасами ископаемого топлива Россия, казалось бы, может пока не спешить. Но, и это главное, нам нельзя отстать технологически, чтобы не пришлось в будущем эти новые технологии покупать. Да, мы – сырьевая страна: сегодня доля от продаж органического топлива составляет две трети в российском экспорте. Но что будет с этим сырьем и с нами, когда большинство стран перейдут на возобновляемые источники энергии?



Литература

Алексеев С. В., Куйбин П. А., Шторк С. И. и др. Явление вихревого перемешивания в закрученном потоке // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103, № 7. С. 516–521.

Алексеев С. В., Бородулин В. Ю., Гнатусь Н. А. и др. Проблемы и перспективы развития петротермальной энергетики // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. № 1. С. 1–6.

Леонтьев А. И., Алексеев С. В., Волчков Э. П. и др. Вихревые технологии для энергетики. М.: Издат. дом МЭИ, 2016. 328 с.

Мальцев Л. И., Алексеев С. В., Кравченко И. В. и др. Устройство для сжигания водоугольного топлива (варианты). Евразийский патент № 030083. Дата выдачи патента 29 июня 2018 г.

Alekseenko S. V. Efficient Production and Use of Energy // Chapter 3 in Book: Sustainable Energy Technologies, ed. K. Hanjalic, R. Van de Krol, A. Lekic. Springer, 2008. P. 51–74.

Alekseenko S. V., Nakoryakov V. E., Pokusaev B. G. Wave Flow of Liquid Films. N. Y.: Begell House, 1994. 313 p.

Alekseenko S. V., Kuibin P. A., Okulov V. L. Theory of Concentrated Vortices: An Introduction. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 2007. 506 p.

Alekseenko S. V., Aktershev S. P., Bobylev A. V. et al. Nonlinear forced waves in a vertical rivulet flow // J. Fluid Mech. 2015. V. 770. P. 350–373.