

УДК 666.3; 546.07; 541.18.

Альтернатива альтернативной водородной энергетике на автомобильном транспорте

В.В.Зырянов

Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,

Введение

Водородная энергетика считается современной альтернативой традиционной, основанной на сжигании органического топлива, т.е. накопленной на земле солнечной энергии за миллионы лет. Наблюдается устойчивая тенденция сокращения разведанных запасов органического топлива на фоне ускоренного роста его потребления. Очевидно, что как в пессимистическом, так и оптимистическом варианте прогноза баланс между спросом и предложением будет нарушен. Не столь важно, когда это произойдет – через двадцать лет, или через полвека. Важно другое. Водородная энергетика требует гигантских затрат на НИОКР, а также на инфраструктуру при ее использовании для транспортных средств. При этом часто забывается очевидная истина: водород не топливо, а только энергоноситель. При производстве водорода из природного газа по цене 3 \$/ГДж стоимость его производства без связывания углекислого газа составляет 5.6 \$/ГДж, с учетом связывания и захоронения 7 \$/ГДж [1]. В одном месте на специализированном производстве со значительными энергозатратами водород как энергоноситель должен производиться, очищаться, а затем транспортироваться к станциям типа современных заправок автомобильным топливом, где он будет доступен потребителям, имеющим подготовленные резервуары. То есть водород есть аналог электрических аккумуляторов, имеющих просто ниже удельную энергию - отношение запасенной энергии к массе. Подавляющая доля потенциального рынка водорода ориентирована на потребление легковыми автомобилями. Уменьшение эмиссии углекислого газа в атмосферу при производстве водорода на заводах произойдет только в том случае, если отход производства - углекислый газ будет уловлен, переведен в твердое состояние и захоронен, например, в мировом океане или подземных хранилищах. Оценка затрат на эти операции составляет порядка 20 \$/т. Очевидно, что только незначительная доля производственных мощностей по получению водорода может быть расположена на побережье океана, поэтому цена захоронения CO₂ для удаленных регионов будет, как правило, несоразмерна достигаемому эффекту.

Экологические последствия снижения эмиссии парниковых газов в атмосферу таким путем пока всерьез не анализировались.

При предлагаемом подходе использования водорода на автомобильном транспорте не изменяется сложившийся уклад жизни и бизнеса, а именно; одни компании будут производить товар (водород) и доводить его до нужной степени очистки (для низкотемпературных топливных ячеек на полимерных электролитах PEFC требуется водород высокой чистоты), другие будут заниматься его транспортировкой на станции, третьи будут отпускать товар конечным потребителям. Фактически потребитель может и не заметить перемен – он платит деньги и получает за них возможность проехать определенное расстояние до следующей заправки. В рамках сложившегося образа жизни, с точки зрения потребителя, произойдет снижение эмиссии парниковых газов в атмосферу в том месте, где движется транспорт, потребляющий водород вместо обычного органического топлива. Произойдет революция в отдельном секторе экономики, за которую придется платить прямо или косвенно всем остальным. Для подавляющей части населения планеты, а также для многих стран с невысокой плотностью населения и без мегаполисов, эта проблема (эмиссия CO₂ в мегаполисах) далеко не главная. Какова же цена предлагаемого водородного транспорта?

Стоимость автомобиля на водородном топливе резко вырастет. Одновременно стоимость затрат на топливо упадет. Несложно оценить тенденции в соотношении затрат. Примем, что сегодня средний автомобиль стоит 30.000 \$. Автомобиль служит примерно 10 лет, проезжает до замены или утилизации в среднем 4000 дней по 100 км в день, итого 400.000 км или 10 оборотов по экватору. Расход бензина или другого органического топлива составит (при расходе 10 л на 100 км) примерно 40.000 л, или 40.000 \$ при средней цене 1\$/л. Если учитывать другие затраты на автомобиль, то можно принять с достаточно неплохой точностью, что половина транспортных затрат ложится на топливо. Автомобиль на водородном топливе будет стоить, скажем, в 2 раза дороже, т.е. 60.000 \$, а с учетом других затрат он обойдется в 70.000 \$ до отработки ресурса. Эффективность водорода как топлива выше, поэтому можно принять себестоимость проезда по топливу в 4 раза ниже. В итоге имеем примерный паритет по полной себестоимости проезда. То есть потребителю ожидать экономии при переходе на водород нет оснований. Скорее наоборот. Если посчитать банковский процент и упущенную выгоду из-за потраченной сразу вдвое большей суммы на автомобиль того же класса, то дорогой автомобиль на водороде экономически невыгоден потребителю даже при его массовом производстве и очень малом ~5% банковском проценте. Если

посчитать реальную стоимость автомобиля в таких странах, как Россия с относительно высоким % прироста инвестированных средств (~25% в год, т.е. среднее между банковским % и доходом в ПИФах), то цена автомобиля на водороде фактически вырастет в ~5 раз за время эксплуатации относительно обычного автомобиля. Другими словами, среднему потребителю в России приобретение такого товара крайне невыгодно.

Не менее важной является проблема безопасности. Аварии на водородных объектах (заводах, трубопроводах, станциях, транспортных средствах) будут намного разрушительнее по последствиям, чем сейчас на аналогичных объектах, работающих с органическим топливом. По сути, за более чистый воздух в местах пользования водородным транспортом придется не только платить деньгами, но и высоким риском крупных катастроф. Уменьшение содержания углекислого газа в месте его производства можно добиться с помощью зеленых насаждений. Однако развитие парков для решения этой местной проблемы в течение большей части года, по крайней мере, в относительно теплых США и других развитых странах, не попадает в область интересов бизнеса, т.к. не предполагает прибыли. В качестве аргумента в пользу водородной энергетики приводят опыт успешной эксплуатации водородопроводов в Рурской области Германии в течение 50 лет, а также длинного трубопровода между Бельгией и Францией протяженностью 400 км. Такая же аргументация в пользу дешевой атомной энергии была до аварии в Чернобыле. Одной аварии на атомной станции хватило, чтобы избавиться от иллюзии дешевой энергии и установить примерный паритет по реальной стоимости энергии, произведенной разными станциями. При создании массовой сети заправок с транспортировкой больших количеств водорода поверх сложившейся инфраструктуры (в России коллапс имеющейся инфраструктуры в мегаполисах уже скорее факт, чем прогноз), а также при резком увеличении количества заводов, производящих водород, даже по самым современным технологиям, риск техногенных катастроф крупного масштаба растет нелинейно быстро. С учетом террористической опасности, не уменьшающейся из-за увеличения пропасти между богатыми и бедными странами, риск становится чрезмерно велик.

Наиболее близкая перспектива использования водорода в транспортных средствах связана с использованием полимерных мембран нового поколения типа Nuflon [2]. Однако низкотемпературные процессы на органических мембранах идут только при использовании благородных металлов в качестве катализаторов. Нетрудно предсказать рождение новой отрасли криминального бизнеса, основанной на краже из

транспортных средств, в первую очередь легковых автомобилей, сверхдорогих энергетических установок с целью извлечения из них благородных металлов дороже золота.

Если переложить на потребителя все реальные затраты, сопровождающие массовое внедрение водородной энергетики в транспортные средства, то ответ потребителя будет очевидным. В целом ряде стран, включая Японию, США, Исландию, государство берет на себя часть затрат по внедрению водородной энергетики в транспортные средства, чтобы снизить начальный барьер и запустить этот процесс. Однако, инфраструктурные затраты в целом остаются неприемлемо большими даже в странах с развитой инфраструктурой, как Япония, ЕС. Единственным реальным способом массового перехода на водородное топливо является законодательный акт на полный запрет эмиссии парниковых газов на транспортных средствах. В связи с подобными методами решения «экологических» проблем вспоминается аналогичная ситуация с запретом на производство, распространение и использование фреонов из-за их влияния на озоновые дыры. Американская корпорация Дюпон, разработавшая альтернативные фреонам охлаждающие системы, поддержала нужные исследования некоторых ученых по влиянию фреонов на уменьшение озонового слоя, обеспечила PR компанию. В итоге группа ученых получила Нобелевскую премию, ООН запретило производство фреонов, а корпорация Дюпон опередила конкурентов на несколько лет и получила сверх прибыли на мировом рынке, намного превысившие затраты на операцию. Последующие исследования по этой области уже не так хорошо финансируются и не столь назойливо преподносятся в СМИ. Другие источники поступления газов, также снижающие содержание озона в атмосфере и значительно более мощные, остались, т.к. не зависят от человеческого фактора. Более того, появились результаты новых исследований, свидетельствующие о связи озоновых дыр с геологическими разломами, т.е. никак не зависящими от деятельности человека. Периодические колебания размеров озоновых дыр также не надо сбрасывать со счета, но для этого необходимы более длительные сроки наблюдения. Забота об экологии правительства США и ряда международных корпораций, в первую очередь американского происхождения, особенно впечатляет на фоне не ратифицированного США, Японией и др. странами, в первую очередь виновными в эмиссии парниковых газов, Киотского протокола. Водородная энергетика на автомобильном транспорте – это классическое *deja vue*. Ключевые игроки играют по тем же нотам и преследуют те же интересы. Фактически под призывы о сохранении чистого воздуха одна отрасль (автомобильная) желает потратить общие средства из госбюджетов на создание рынка

для нового поколения своей значительно более дорогой продукции. Значительная часть научного сообщества уже вовлечена в разработки топливных ячеек и мембранных реакторов для решения задач, связанных с новыми энергетическими установками для транспортных средств. Например, по полимерным протоно-обменным мембранам на основе Nafion только в доступной печати опубликовано более 30.000 работ! Ясно, что большая часть финансовой поддержки этих исследований получена из некоммерческих фондов и государственных бюджетов.

Одним из очень важных последствий законодательного запрета на транспортные средства, допускающие эмиссию парниковых газов, причем в рамках соглашений ВТО, станет запрет на ввоз «устаревшей» продукции из других стран. Фактически это приведет к уничтожению основных конкурентов или захват их в собственность под благовидным предлогом борьбы за экологические нормы.

Постановка задачи

Означает ли вышесказанное, что водородная энергетика не имеет перспектив? Конечно, нет. Просто каждой стране необходимо правильно расставлять акценты в развитии того или иного перспективного направления, особенно в связи с огромными затратами из государственного бюджета, соразмеряя с другими направлениями и реально существующей общественной потребностью. Оптимизм внушает прецедент – асимметричный ответ ВС РФ на американскую программу ПРО. Почти по всем областям промышленности, а также в образовании, медицине, законодательной деятельности, налоговой системе, ПДД и т.д. происходит слепое копирование «западных» подходов и решений, без реальной привязки (аккомодации) к уже существующему законодательству и сложившейся практике к стране, объективно и субъективно имеющей отличия. Отметим очевидное - огромную и принципиальную разницу между Россией и другими странами по ряду факторов постоянного характера: это климат и огромная территория. Каждая страна имеет свою специфику, которую должна учитывать компетентная власть при принятии тех или иных решений. Надо принимать такие решения на всех уровнях, чтобы влияние сурового климата максимально компенсировалось нашим преимуществом – землей и другими ресурсами. Реально процесс осознания собственных интересов России элитой, принимающей решения, только начинается. Водородная энергетика – это очень важный тест на способность власти отвечать современным вызовам в национальных интересах.

Особенно большие негативные последствия слепого копирования и несоответствия законодательного регулирования наблюдаются в области

строительства. Особо отметим: негативного для основной части граждан, но вполне позитивного для малой ее части, получающей доходы именно благодаря такому состоянию дел. Около половины жилищного фонда страны не пригодно для проживания. Вторая половина перейдет к этой категории при жизни одного поколения, потому что строится по сути то же самое, затратное и неадаптированное к особенностям страны жилье. Даже содержание жилья становится неподъемным значительной части населения при его низком качестве. Инерция, прежде всего субъективного характера, не позволяет выбраться из этой глубокой колеи, созданной во времена идеологического государства. Строительство и распределение жилья было монополией государства и наиболее действенным инструментом управления при уравниловке в доходах. Качество жилья и реальная стоимость его содержания никогда не были приоритетом. Переход к новой энергетике неизбежно будет идти параллельно со строительством, набирающем обороты, но в старом затратном варианте. Такой ситуации нет нигде в мире, поэтому копирование в России чужих подходов даст совершенно иные результаты по сравнению с теми же США или Японией. Попробуем совместить эти вектора развития – новое строительство и новую водородную энергетику. Идея заключается, по сути, в том, что сопряженное (скоординированное) развитие двух важнейших отраслей не нуждается в революции с огромными инвестициями из государственного бюджета и еще больших вынужденных затрат потребителей. Достаточно будет эволюционного развития с минимальными инвестициями для запуска процесса.

Новая концепция эко-строительства

Концепция эффективного малоэтажного строительства экодомов была впервые кратко описана в проекте компании «Экодом», победившего на Всероссийском конкурсе «Свой дом» под эгидой Минстроя РФ в 1996 г. Научные аспекты, лежащие в основе пакета новых гибких мини-технологий, которые настраиваются на использование и переработку местного и некондиционного сырья, включая грунт с места строительства, вынимаемый под домами, а также отходы энергетики, опубликованы в академическом журнале [3], а также доступны в [4]. Авторские свидетельства и патенты на новую технику типа ЭМК, позволяющую реализовать комплексную переработку сырья и отходов, также давно известны [5-8]. Проект «Новая малоэтажная Россия» в форме основных тезисов опубликован в Интернете на сайте журнала «Эксперт». Более полный вариант в виде бизнес-плана «Экопоселок» был подготовлен и заявлен на объявленный конкурс в СибФО. Однако, эксперты,

привлеченные журналом «Эксперт», в принципе не рассматривали проекты, представленные физическими лицами, хотя таковые и были допущены к конкурсу. Конкурс, объявленный в СибФО под титулом «Сибинновация», собрав конкретные предложения в форме бизнес-планов, бесследно исчез.

Перечислим основные идеи и положения проекта «Экопоселок» [9], но предварительно необходима стандартная оценка состояния дел.

Состояние дел

В собственном пригородном доме предпочли бы жить 60% населения страны. Это общемировая тенденция. Поэтому, спустя несколько месяцев после старта акцент в национальном проекте доступного жилья со строительства многоэтажек в мегаполисах был перенесен на «одноэтажную Россию». Теоретически, в т.ч. на примере стран с развитой рыночной экономикой, стоимость жилья в одноэтажных домах ниже, чем в многоэтажных. Однако в наследство от СССР России досталась строительная база только для возведения многоэтажных панельных домов. Бум индивидуального строительства коттеджей с заоблачными затратами и низким качеством из-за использования непригодной базы лишней раз показал, что России нужна новая строительная отрасль, способная справиться с новыми для нее задачами малоэтажного строительства. Как возможное решение жилищной проблемы предлагается массовое строительство деревянных сборных домиков при помощи государства (снижение налогов, проведение коммуникаций и т.п.). По странному стечению обстоятельств, эти предложения поступают от тех, кто вложил средства в подобные заводы, а отдачи не получает. Связано это с тем, что объем строительства новых дач минимален – старые некуда девать, т.к. советский образ жизни с дачей для производства продуктов заканчивается. На другие цели деревянные сборные домики элементарно непригодны. Во-первых, рано или поздно, они сгорят вместе с имуществом. Во-вторых, тепловая инерция таких домов в обычные морозы – полсуток. Жизнь в таком доме – постоянная борьба за существование. Вызывает особое удивление постановка вопроса, «из какого материала делается дом?» в стране, первой вышедшей в космос. Предложения чиновников в рамках национального проекта по созданию площадок с готовыми коммуникациями – водой, канализацией, теплом и электроэнергией для одноэтажного индивидуального строительства с ДСК – напоминает кукурузную кампанию с огромными последствиями для экономики. Мягкий климат в пределах Садового кольца оказывает сильное влияние на принимаемые решения для всей страны, в которой, условно говоря, 9 месяцев зима, остальное - лето. Если в большом городе при аварии на

коммуникациях есть запасные варианты и возможности для быстрой ликвидации, а большие дома сравнительно медленно остывают, то при огромном рассредоточении одноэтажного жилья аварии ведут к огромным рискам и необратимым последствиям. Тепловая инерция обеспечивается хорошей теплозащитой и массой дома. Дороги не вынесут перевозки требуемой массы материалов, не говоря уж о транспортных расходах и пробках. Кроме этого, жители таких домов становятся вечными заложниками монополий, которым не составит большого труда переложить свои необоснованные затраты и растущие аппетиты на потребителей. Постановка цели в национальном проекте - минимальная стоимость квадратного метра жилья – невыгодна потребителям, но очень выгодна монополиям ЖКХ. При экономически правильном расчете – жилье в «дешевых» панельных домах первых серий («хрущевках») является чрезмерно дорогим. Как и все товары, жилье имеет начальную стоимость, эксплуатационные расходы, срок службы и качество – уровень комфорта. Цель, поставленная корректно, должна быть сформулирована так: минимальные стоимость и содержание, максимальные долговечность и комфорт. Все варианты, которые уже запланированы госаппаратом, к сожалению, не достигают декларируемой цели. Одноэтажные дома с коммуникациями будут дорогими и по стоимости, и по содержанию, а комфорт ниже, чем в квартирах многоэтажек из-за зимних рисков. Дальнейшее строительство многоэтажек – усиление всех негативных урбанистических тенденций, которые приближают мегаполисы к параличу и необратимому изменению окружающей среды. Проект откровенно буксует по причине некомпетентности и коррумпированности госаппарата, не способного к корректной постановке задачи и ее выполнению. Ипотека в сложившейся ситуации способствует привлечению финансов из будущего, в т.ч. из государственного бюджета, на содержание затратной отрасли и коррумпированной пирамиды.

Концепция эко-поселка

Тем не менее, решение проблемы существует, но со сменой строительной парадигмы. Очевидно, что разумное решение для жителей не отвечает интересам монополий и коррумпированной части госаппарата. Решение проблемы заключается в ответе на очевидные вопросы: что, где, когда, как, из чего, с кем и для кого строить? Ответ существует только комплексный: идеально организованное сезонное строительство индивидуальных полумансардных умных домов в таун-хаусах в эко-поселках на негородской земле с нестационарного министростройкомбината производства основных строительных материалов на базе местных ресурсов с помощью сезонных

строителей для застройщиков (не инвесторов!). Любое вычленение из предложенного решения ведет к разрушению всей конструкции и резкому росту стоимости жилья без других видимых преимуществ. Главным лимитирующим фактором является время: наш климат предлагает в среднем лишь пятимесячный строительный сезон. Если строительство не укладывается в этот срок – стоимость автоматически удваивается со снижением качества строительства. Если дом построен, а инфраструктуры нет, реально дом не используется, т.е. средства вложены впустую и частично потеряны. Следствие очевидно - необходим конвейер по производству основных материалов со сборкой домов с научной организацией труда по единому часовому графику для строительства поселка с инфраструктурой за сезон. НОТ предопределяет выбор технических и организационных решений, обеспечивающих надежность процесса (крыша над домом, мини-ЖД для транспортировки материалов и буфер для них на площадке, несъемная опалубка, балочные перекрытия, минимальные закупки материалов на рынке, подготовка площадки к быстрому строительству, и т.д.). Главным сырьем для мини-строительного комбината является грунт, а также местные ресурсы и отходы (глины, песок, лес, деревоотходы, зола уноса, солома, покрывки, стеклобой). Системы жизнеобеспечения имеют оптимальную автономность за исключением электроснабжения (автономные энергоустановки на природном газе рассмотрены далее). Вместо водопровода, поставляющего непригодную для питья воду, - сбор осадков с крыши дома, хранение в подвале и очистка для технических целей. Питьевая вода – продукт питания, к строительству отношения не имеет. Вместо канализации – сухой биореактор в подвале, с утилизацией переработанных отходов на приусадебном участке в качестве удобрения. Серые стоки собираются и очищаются в подвале, а летом используются для полива участка. Предлагается не стандартная система мер по экономии тепла, которая в итоге реально приводит к нерентабельности при существующей стоимости электроэнергии и газа, а радикальное решение – устранение дорогостоящей системы отопления из дома еще на стадии проекта. Вместо системы отопления – кратное снижение всех тепловых потерь, включая потери через грунт, вместе с умными окнами, аккумулирование тепла в массивных стенах и водных резервуарах, снимаемого с системы разных солнечных коллекторов, являющихся одновременно элементами строительных конструкций (в противном случае они нерентабельны). Принудительная умная вентиляция с подогревом и очисткой воздуха с управлением из дома или единого поселкового центра. Резервное отопление дровами в камине, а также мало мощным тепловым насосом, смонтированным на таун-хауз или поселок. Напомним, что дрова – это эффективно запасенная солнечная энергия, их

потребление минимальное – в десятки раз меньше, чем в обычном деревянном доме, т.е. фактически камин не для отопления, а для дизайна и комфорта. Раздельный сбор отходов и утилизация в масштабе эко-поселка, т.е. вместо обычных и немалых затрат получается прибыль и сохранение окружающей среды.

Разработан в режиме итераций комплексный проект базового дома каркасного типа с многослойным ограждением в таун-хаузе, не требующий отопления на широте Новосибирска с потреблением воды на уровне Европейских норм. В расчетах дома применялись параметры материалов, созданных по мини-технологиям из грунта, золы уноса, соломы. Тепло и вода накапливаются уже в момент строительства и обеспечивают необходимую тепловую инерцию. Главным преимуществом проекта является совместимость всех решений, т.е. это комплексный проект. Например, баланс по грунту (~200 кубометров на дом или ~85% от массы дома): он вынимается на требуемую глубину и весь используется в строительстве, причем 95% без транспортировки - на месте в производстве грунтоблоков. Только для сушки такого объема материалов потребовалось бы ~70000 кВт·часов на один дом, или среднее по масштабам потребления энергии предприятие в расчете на поселок. В предлагаемом проекте это происходит без затрат - в естественных условиях с использованием в качестве стеллажей каркасной конструкции дома.

Мини-технологии для производства основных материалов разработаны на основе уникальной многофункциональной техники нового класса с общим названием электромассклассификатор (ЭМК) [5-8]. Для производства грунтоблоков и керамики на основе грунта разработана пастовая технология – гибрид фарфоровой технологии, обеспечивающей высокое качество сырцовых масс, и обычной технологии экструзии пластичных масс, обеспечивающей высокую производительность. Влажность пасты составляет 22% - на 4% выше, чем в обычном производстве, что позволяет использовать в 20 раз менее мощный легкий пресс. Для управления пластичностью массы на определенных стадиях вводятся электролиты и флокулянты. Под каждый тип грунта производится настройка технологии путем вариации добавок – местной глины, золы уноса и др. Грунт усредняется по глубине выемки организацией работ. Грунтоблок имеет прочностные показатели выше традиционного керамического кирпича марки М100, в том числе благодаря композиционному эффекту – добавке иной глины и более плотному заполнению пространства. Более того, в проекте используются все преимущества грунтоблоков (очистка и поддержание влажности воздуха, повышенная плотность и теплоемкость), а недостатки скрыты технологией строительства. При обжиге сырца при 900-950 °С получается керамика М300-М400.

Такая прочность избыточна для малоэтажного строительства, поэтому будет производиться долговечный облицовочный пустотелый кирпич и черепица (при необходимости).

Для производства дешевого бетона для малоэтажного строительства разработана технология переработки буроугольной золы уноса БУЗ и механической активации цемента, что особенно важно ввиду монополизации рынка цемента. Технология вяжущего на основе БУЗ основана на механической активации поверхности зольных частиц с одновременной сепарацией тонкой фракции на ЭМК. В результате этих операций активность зольных частиц повышается, а крупная фракция ~50%, содержащая вредные и ненужные для бетона компоненты (кокс, крупные частицы оксида кальция, вызывающие разрушение камня после набора прочности, песок) удаляется и перерабатывается далее отдельно. Кокс отделяется для производства керамики, а остатки крупной фракции обрабатываются водой и используются в качестве слабого вяжущего для растворов. Бетон на основе вяжущего из тонкой фракции обладает повышенной в 2 раза прочностью в сравнении с исходной золой, но главное – более надежными свойствами, которые еще повышаются (по нижней границе прочности) до марки, эквивалентной М200 малой добавкой цемента ~10-15%. 3-х дневная выдержка активированного зольного вяжущего на воздухе после получения повышает его активность дополнительно на 20%, а при более длительном хранении активность падает. Благодаря более высокой тонине зольного вяжущего можно использовать в качестве наполнителя местный некондиционный песок. Механическая активация лежалого цемента повышает марку выше исходной. Использование техники ЭМК позволяет найти оптимальное ценовое решение для каждого конкретного района застройки эко-поселка.

В качестве долговечного утеплителя предлагается использовать прессованные блоки соломы в вакуумированной упаковке, а для утепления фундаментов – золоарболит, полученный из БУЗ или отходов ее переработки, деревоотходов, соломы. Таким образом, пакет минитехнологий безотходного производства материалов + пиломатериал для каркаса, обработанный пиро-био-защитными составами для долговечности, обеспечивают проведение общестроительных работ. БУЗ, солома, дерево, цемент в количестве 10% от обычного объема, песок, щебень завозятся на площадку в т.ч. заранее, что обеспечивает бесперебойную работу конвейера. Тяжелая техника, а также оборудование высокой мощности не используются. Размеры установок для производства всей гаммы материалов и изделий соответствуют лабораторному уровню для строительной индустрии и не требуют стационарного

размещения. Для строительства требуется примерно такая же установленная мощность, что и для эксплуатации эко-поселка. При разработке источников питания, основанных на конверсии метана с последующей реакцией окисления водорода в SOFC эко-поселок даже на стадии строительства не будет нуждаться во внешних коммуникациях. Синергизм эко-поселков и новых источников энергии, работающих на водороде из метана, очевиден: строительство жилья в эко-поселках обеспечит громадный рынок новым автономным установкам с высоким КПД, а наличие таких установок снимает оставшиеся ограничения на выбор площадок для строительства.

Проект основан на 14 ключевых оригинальных решениях, одним из которых является пакет мини-технологий по производству материалов из местного сырья и отходов, который не имеет серьезных перспектив при реализации вне данного проекта. Это связано с транспортными расходами, хранением продукции, массой излишних операций, которые повышают стоимость материалов, делая их соразмерными с существующими ценами на рынке.

Неотъемлемой частью дома в эко-поселке является гараж на два автомобиля, который является буфером, снижающим тепловые потери для жилой части. Для автомобиля этот гараж является теплым, что продлевает сроки его эксплуатации очень значительно, практически до уровня стран Северной Европы и Канады. Два автомобиля в семье – это реальная необходимость уже сегодня. В эко-поселке появляется уникальная возможность один автомобиль, работающий на обычном углеводородном топливе, ориентировать на дальние поездки, а другой автомобиль – на этаноле, для местных поездок в мегаполисе. По экологическим нормам двигатель на спирте соответствует водородному, но существенно более безопасный и намного дешевле. Более того, спирт можно производить на земле эко-поселка, используя в т.ч. местные органические отходы. Выделение чистого спирта из продукта переработки отходов бактериями в био-реакторе возможно на гидрофобных полимерных мембранах с минимальными затратами [10]. Таким образом, заправка спиртом на своей заправке в эко-поселке не требует никаких инфраструктурных затрат от государства и потребителей. Более того, спирт является не только экологически чистым топливом, а также чистым и эффективным аккумулятором солнечной энергии: КПД растений существенно выше солнечных батарей. Это возобновляемый ресурс, который легко производить в необходимом количестве на земле, которой в нашей стране более чем достаточно: дефицит площадок для строительства создан чиновниками искусственно. Бразилия уже сориентирована на такой вид топлива. В связи с ростом цен на нефть,

переход на альтернативный спирт стал выгоден даже на Украине, при индивидуальной (не массовой) реконструкции двигателей.

Таким образом, корректная постановка задачи для водородной энергетики, по крайней мере сегодня, не должна включать энергетические установки для легковых автомобилей, где безопасность недостаточна, а инфраструктурные и прочие затраты чрезмерны. Для автобусов и части грузового транспорта с определенными маршрутами постановка задачи перехода на водородное топливо может стоять, но в чисто экономической плоскости и без преференций на субсидии из государственных источников. Для этих транспортных средств было бы разумно развивать обычные электрические аккумуляторы, т.к. масса для них не является критически важным параметром. Экологическая составляющая от этой части транспорта слишком ничтожна, чтобы заставлять все другие отрасли платить дополнительный налог. Для России строительство нормальных дорог и развязок обеспечит несравнимо больший экологический эффект, чем двигатели на водороде для части транспортных средств.

Благодаря развитию информационных технологий, более половины всех рабочих мест (с учетом сферы услуг) не требуют транспортировки к месту работы. Эко-поселок не только отвечает современной тенденции развития рынка труда, но и подтолкнет этот процесс. Затраты на содержание жилья и других помещений (офисных, малых производственных, и т.д.) практически перестанут зависеть от монополий и снизятся более, чем на порядок (часть разницы, очевидно, попадет инвесторам и собственникам помещений). С учетом совмещения места работы и места проживания реальные доходы для среднего работника с зарплатой 300 \$ в месяц автоматически удваиваются при переносе места жительства в эко-поселок. В среднем свободное время работника увеличится на ~10-15 часов в неделю за счет отсутствия вынужденных потерь времени, а именно наличие свободного времени в первую очередь характеризует качество жизни. Можно полагать, что существенно изменится жизненная мотивация, причем особенно сильно это коснется основной массы людей с доходами средними и ниже средних, семейные интересы получают приоритет, без чего вырождение России лишь вопрос времени. Уровень комфорта, качество жизни в эко-поселке реально несопоставимы с имеющимся сейчас уровнем в мегаполисах. Попутным эффектом, особенно полезным в России, явится некоторое ослабление давления на инфраструктуру, что облегчит возможность ее планомерной реконструкции. Переход на устойчивый тип развития – единственно возможный для выживания цивилизации в ближайшем будущем, посредством строительства эко-поселков возможен сейчас, причем практически без каких-либо серьезных усилий и

больших финансовых затрат со стороны государства. Фактически появление экопоселков демонстрирует выгодный всем новый образ жизни, значительно отличающийся от существующего. Постоянный стресс и отсутствие свободного времени есть минимальная плата за нерационально устроенный урбанизированный стиль жизни, несмотря на бурный научно-технический прогресс.

Водородные миниэлектростанции на базе CMR и SOFC

Для стационарных установок водородной энергетики ситуация существенно отличается. Отсутствие сильных ограничений на массу и объем установок стимулирует разработку полной цепочки из установки для риформинга природного газа (метана), очистки водорода от CO и CO₂, получения электроэнергии окислением водорода кислородом из воздуха на твердо-оксидных топливных элементах SOFC, содержащих газоплотные селективные мембраны из кислород-ионных твердых электролитов. Наиболее подходящим материалом для этой цели сегодня рассматривается циркониевая керамика, допированная скандием и другими элементами для стабилизации высокотемпературной кубической модификации, т.к. достаточно высокая проницаемость достигается уже при 1000-1100 К [11-13]. В такой постановке задачи проблема высокой степени очистки водорода, его хранения и транспортировки отсутствуют. При разработке качественных и надежных систем они будут востребованы в качестве вспомогательных энергетических установок на транспортных средствах, т.к. им требуется некоторое время порядка 1-3 мин для выхода на рабочий режим.

В хранении водорода при обычных давлениях наметился прогресс: группой Jeffrey R. Long из университета в Беркли, США, открыты новые металлоорганические соединения с наноразмерными полостями на основе бензолтристетразолата марганца, которая смогла поглотить 6,9% (по весу) или 60 г/л (по объему) водорода при 77 К и давлении 90 атм, которые впервые удовлетворяют требованиям Министерства Энергетики США. Одновременно подобные же результаты получены группой австралийских ученых Cameron J. Kerper и др., использовавшей в качестве исходного вещества бензотрикарбоксилат меди, а также коллективом Anthony K. Cheetham из университета в Санта-Барбаре, США, который применил сульфоизофталат никеля [ссылка на сайт <http://rnd.cnews.ru>]. Однако, несмотря на очевидное научное открытие мирового уровня, говорить о масштабах возможной коммерциализации новых материалов преждевременно.

Несмотря на длительные исследования, начиная с 1970 гг. и на огромные затраты на НИОКР ($\gg 10^{11}$ \$), проблемы конверсии метана в каталитических мембранных реакторах CMR и получения электрической энергии из водорода в SOFC не решены на уровне, приемлемом для коммерциализации. Существует широкий спектр технических проблем, плюс ценовой барьер, заданный в т.ч. хорошо отлаженной технологией паровой конверсии метана [14]. Обзор научных и технических проблем, а также причины отсутствия видимого прогресса в этой области приведены в [15]. Большая часть разработок значительно превышает установленный ценовой барьер, а надежды на снижение стоимости связываются в основном с массовым выпуском продукции на рынок. Выбор того или иного решения крайне затруднен, т.к. конкурируют не только однотипные процессы и устройства, но и разные подходы, сопоставление которых, особенно с учетом специфических показателей для разных стран, не представляется возможным. Крупные инвестиции, которые требуются в создание новой продукции и главное – рынка под нее, подвергаются большому риску. Таким образом, вся эта область находится в поиске оптимальных решений.

В предложенной нами новой стратегии *a priori* используется комбинация только дешевых и технологичных операций для получения селективных асимметричных керамических мембран с разделенными функциями с оптимальной архитектурой и минимальным потреблением дорогих материалов [16]. Работа привлекла внимание, в т.ч. крупнейшего издательства научной литературы Novapublishers, NY, предложившего написать книгу по современной керамике (находится в печати). Другими словами, если вся комбинация материалов и операций будет оптимизирована, то известные подходы с использованием дорогих операций и материалов не имеют шансов в конкурентной борьбе [17]. Понимание того, что в создании мембран важна в конечном итоге только комбинация материалов, пришло совсем недавно [18]. В то же время в доступной научной литературе практически все публикации посвящены отдельному исследованию относительно простых соединений и композитов.

Архитектура мембран для CMR и SOFC показана на рис. 1. Чтобы обеспечить высокую селективную проницаемость мембран по кислороду, требуется толщина газоплотной керамики порядка 10 μm [19]. При более тонких мембранах поток кислорода лимитирует поверхностная реакция обмена, а также снижается долговечность. Использование инертной пористой несущей подложки очень перспективно, т.к. при этом не только снижается расход материалов, но и повышается механическая прочность изделий с толщиной стенок порядка 1 мм. Керамических подложек с аналогичными свойствами просто не существует. Неизбежно возникающие

при этом проблемы совместимости требуют решения. Речь идет не только о близкой температуре спекания и близкой усадке керамических слоев и пористой подложки, но и о химической совместимости керамик между собой и подложкой. При высоких температурах, которые требуются для получения газоплотной керамики с селективной проницаемостью, идут не только процессы спекания, но и химические реакции. Отметим, что сам термин «совместимость» крайне редко встречается в научных публикациях.

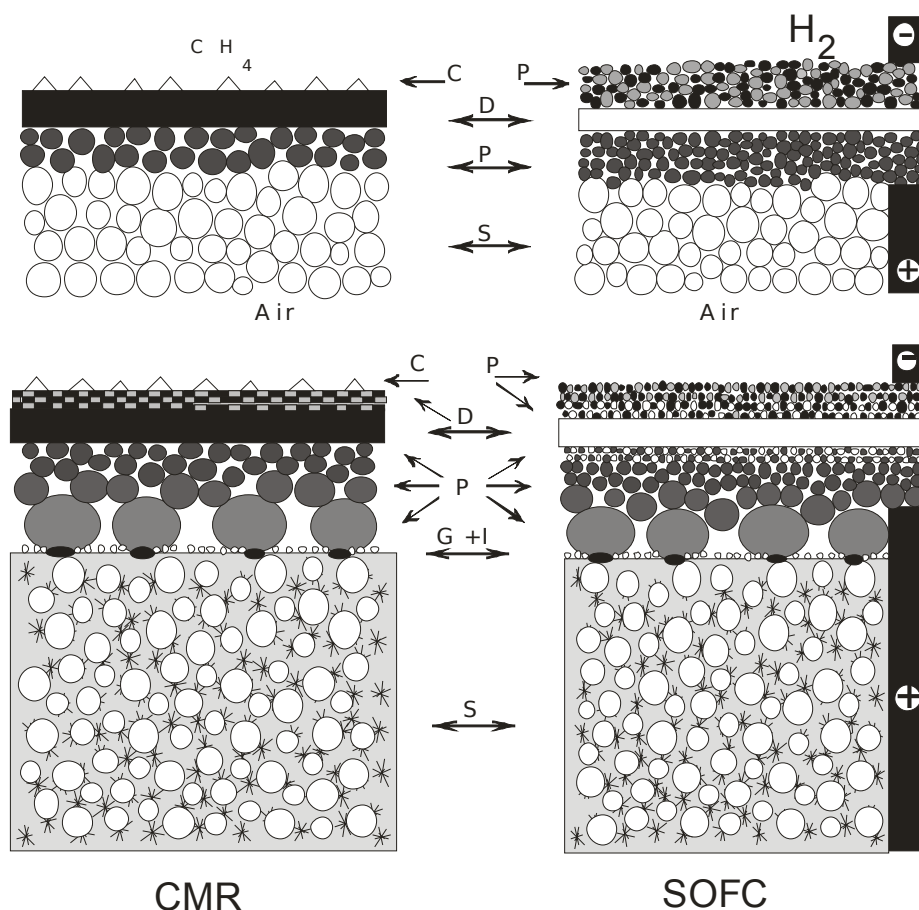


Рис. 1. Идеальные схемы многослойных мембран для CMR и SOFC (вверху), и реальные конструкции с градиентом пористости и состава в керамических слоях, на двухслойной подложке с барьерным интерслоем (внизу). С – катализатор, P- пористые керамические слои, D- плотные керамические слои, G – стекло, I – барьерный интерслой, S- инертный пористый субстрат.

При изготовлении мембран применяются операции литья: для создания подложек используется литье водных шликеров на основе природных наноматериалов – каолинов в гипсовые формы, что дает возможность производить подложки любой формы, включая пробирки – идеальные по форме на стадии исследований и создания технологии [20]. Для нанесения керамических слоев применяется литье органических

шликеров на основе спирта и ацетона с полимерными связующими. Согласование усадок подложек и керамических слоев достигается оптимизацией состава стеклокристаллических подложек, комбинацией операций их модификации, включая золь-гель, импрегнирование солями, выщелачивание, а также подбором гранулометрического состава керамических слоев, получаемых из механохимических нанопорошков сложных оксидов, рис. 2. В области А на рис. 2 образуется волнообразный рельеф поверхности керамики из-за сильного сжатия подложкой. В области В выполняются идеальные условия для спекания газоплотных мембран, аналогичные двумерному горячему прессованию. В области С керамика находится в напряженном состоянии, что может привести к растрескиванию мембран. Область D абсолютно неприемлема из-за отслаивания керамики и формирования структуры типа такыр. Однако, при спекании реакторов имеет место некоторое согласование усадок из-за взаимодействия между керамикой и подложкой. Другими словами, для тонких пленок наблюдается анизотропия усадок (на рис. 2 величины усадок получены отдельно - для пробирок и независимо на керамическом диске).

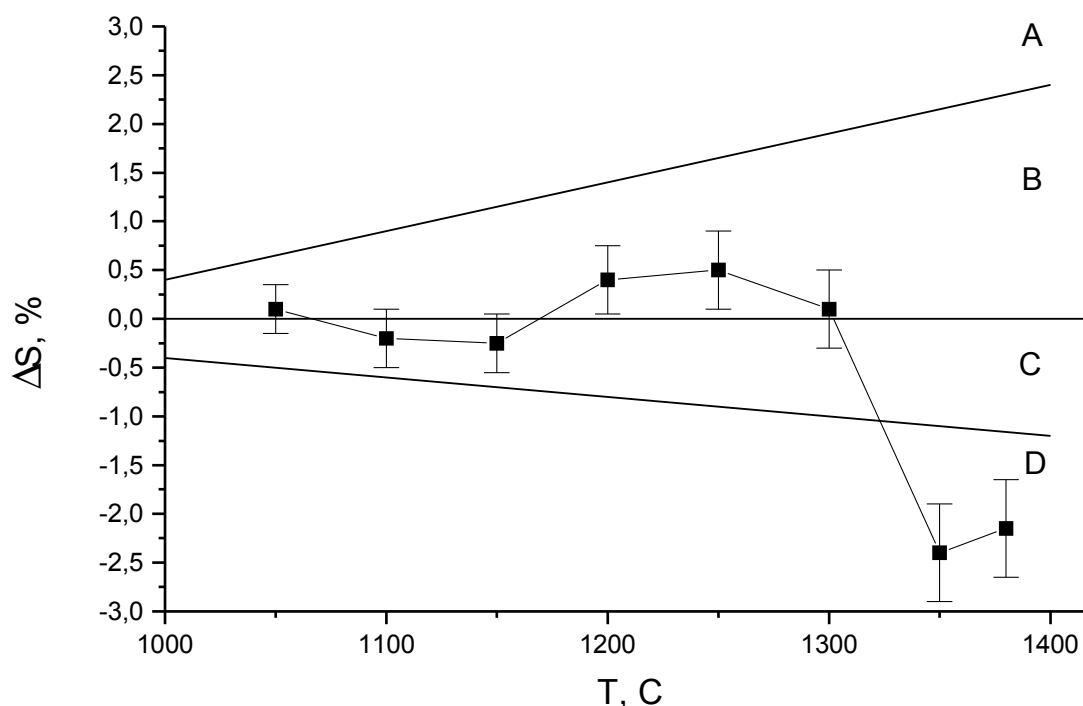


Рис. 2. Величина рассогласования в усадках при спекании между субстратом, модифицированного выщелачиванием и ZrO_2 -золе, и керамикой состава $La_{0.45}Ca_{0.35}Sr_{0.2}Fe_{0.2}Co_{0.35}Ni_{0.2}Cr_{0.05}Mg_{0.15}Zr_{0.05}O_{2.8}$ – кандидатом в материалы для макропористого слоя мембраны.

Неизбежное химическое взаимодействие на границе подложка-керамика ведет к образованию легкоплавкого стекла. Этот процесс начавшись, далее идет с ускорением (breeding reaction), образуя сплошной слой стекла, блокирующий доступ кислорода к керамике. Разница в КТР между кварцевым стеклом в стеклокристаллической подложке и легкоплавким стеклом, образовавшимся в результате химической реакции с оксидами керамики типа Fe_2O_3 , CoO , CaO , SrO , и т.д., столь велика, что ведет к растрескиванию мембран при охлаждении. В то же время, без химического взаимодействия и образования стекла керамика спекается независимо от подложки, в результате чего при любых неоднородностях происходит отслаивание керамики и ее разрушение (структура керамики типа такыр). Необходима оптимальная степень взаимодействия керамики с кварцевым стеклом подложки с образованием изолированных капель стекла микронных размеров в области контакта с керамическими частицами из агломератов ~ 50 μm . Для регулирования этого процесса поверхность стеклокристаллической подложки обогащается муллитом еще на стадии приготовления литьем, а также дополнительно вводится барьерный интерслой, например, из наноразмерных частиц корунда. В этом случае образование стекла контролируется более надежно, и при правильном режиме обжига можно получить газоплотную мембрану с пористым слоем керамики на инертной пористой подложке, т.е. близкую к идеальной архитектуре.

Сама идея архитектуры многослойных мембран с управляемым градиентом пористости и химического состава керамики появилась на основе знания специфических особенностей нанопорошков, полученных механохимическим синтезом при комнатной температуре – механохимическим керамическим методом МКМ [21-22]. Нанопорошки имеют необычную многоуровневую иерархию структуры: кристаллиты размером ~ 5 -90 нм (обычно ~ 30 нм), состоящие из более мелких образований (доменов, двойников, модулированных областей и т.п.) размером 2-3 нм, обладают чрезвычайно низкой относительной плотностью ~ 0.9 , что дает им серьезное преимущество по активности в спекании относительно порошков, полученных другими современными методами [23]. Кристаллиты объединены в прочные плотные агрегаты до 1 μm с относительной плотностью ~ 0.8 , которые в свою очередь формируют вторичные агломераты с размерами до 100 μm и относительной плотностью ~ 0.7 (плотность зависит от условий и длительности механической обработки). Именно такая структура порошков обеспечивает возможность создания многослойной мембраны с близкой усадкой разных слоев, созданных из разных фракций. Рассогласование усадок является главной проблемой при создании двухслойных и более сложных мембран. По этой

причине работы, посвященные двухслойным мембранам, носят единичный характер, несмотря на очевидные преимущества мембран с разделенными функциями [24]. Разделение механохимических нанопорошков на фракции с требуемым размером частиц реально возможно только на технике ЭМК, либо мокрыми методами, неприемлемыми при практической реализации. После выделения из порошка нужной фракции обычное распределение агломератов по размерам восстанавливается после механической обработки в течение 30-60 с. Нанопорошки, получаемые МКМ, самые дешевые среди современных методик, причем уже имеющееся пилотное оборудование вполне достаточно по производительности для промышленного производства нанопорошков для мембран. Еще одно решающее преимущество МКМ – возможен синтез соединений со структурой перовскитов и флюоритов любой сложности, что абсолютно необходимо при подборе комбинации совместимых по многим параметрам материалов мембраны [25]. Большое значение также имеют скорость получения соединений и быстрое тестирование мембран в готовых реакторах в форме пробирок [20-22]. Несмотря на огромное количество параметров, требующих оптимизации при изготовлении реакторов (по неполным оценкам 216), ускоренное получение материалов и тестирование обеспечивает паритет по затратам времени. В конце 2006 года достигнут неплохой уровень – неселективная проницаемость мембран (т.е. через трещины и другие дефекты) снижена до 0.3%, что вполне позволяет переходить на следующий этап исследований – подбор катализатора и условий конверсии метана.

По изготовлению SOFC с помощью развитых методов и операций, ряда правил синтеза химически совместимых соединений [25], а также правила синтеза керамик с требуемой температурой спекания [20], нет каких либо принципиальных отличий от СМР. Самая сложная часть проблемы - механохимический синтез твердого электролита на основе допированной скандием циркониевой керамики с температурой спекания до плотного состояния ~ 1650 К реализован в работе [26], что позволяет полностью воспроизвести архитектуру SOFC, показанную на рис. 1. Реактора, получаемые сейчас для исследований, имеют рабочую поверхность ~ 40 см², т.е. они гораздо ближе к размерам реальных реакторов для мини-электростанций, чем к обычным лабораторным мембранам с поверхностью 1-4 см². Весь разработанный пакет технологических операций и оборудования позволяет практически без изменения параметров обеспечить масштабирование мембран до рабочей поверхности 200-400 см². Сборка трубных реакторов также возможна, причем без применения металлических элементов в рабочей зоне с высокой температурой, что дает еще один порядок увеличения мощности установки.

Оптимальная рабочая температура для CMR и SOFC составляет 1000-1100 К, а температура спекания на разработанных стеклокристаллических подложках ~1650 К. Большая разница между температурами получения и эксплуатации должна обеспечить более высокую долговечность при прочих равных параметрах. Для снижения деградации мембраны со стороны восстановительной среды могут дополнительно покрываться тонким защитным слоем из композита типа F+P, в котором флюорит, например, на основе допированного гадолинием диоксида церия, сохраняет механическую целостность керамики. Однако главными факторами повышения долговечности мембран можно полагать оптимизацию химического состава газоплотной керамики и высокий поток кислорода благодаря оптимальной архитектуре.

Заключение

Заметного прогресса в водородной энергетике можно достичь корректной и обоснованной постановкой задач на основе критического анализа существующих тенденций и полученных результатов. Междисциплинарный характер проблем в водородной энергетике требует комплексного подхода. Например, при совмещении векторов развития в малоэтажном строительстве в направлении эко-поселков и водородной энергетике в направлении мини-электростанций можно ожидать синергизм, особенно сильный и важный для России.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 06-03-32131, МНТЦ, № 3234, СО РАН, Междисциплинарный Интеграционный проект СО РАН + НАН Украины № 95, а также Министерства Науки и Образования РФ.

Список литературы

1. Lu G.Q.(Max), Wang S. Ni-based Catalysis for carbon dioxide reforming of methane // Chemtech. January, 1999. P. 37-43.
2. Ghielmi A., Vaccarone P., Troglia C., Arcella V. J. // Power Sources. 2005. Vol. 145. P. 108-115.
3. Зырянов В.В. Решение глобальных экологических проблем на основе локальных минитехнологий производства композиционных строительных материалов для экологического строительства // Химия в интересах устойчивого развития. 1995. Т. 3, № 3. С. 215-230.
4. Зырянов В.В. Механохимические явления в оксидных системах: Автореф. Дис. ... докт. Хим. Наук. Новосибирск, 2000.

5. А.с. 1403439 СССР МКИ 4 В 03 С 7/02. Электромассклассификатор / Зырянов В.В. 1988.
6. А.с. 1818747 СССР МКИ 4 В 03 С 7/02, В 07 В 7/00. Электромассклассификатор / Зырянов В.В. 1992.
7. Патент РФ 2065782 МКИ 6 В 07 В 7/083. Устройство для разделения каменноугольной золы / Зырянов В.В. Открытия. Изобретения. 1996. № 24.
8. Патент РФ 2065782 МКИ 6 В 02 С 13/14, 13/08. Мельница / Зырянов В.В. Открытия. Изобретения. 1996. № 24.
9. Зырянов В.В. Доступное индивидуальное жилье в экопоселке, не требующее обычного отопления и коммуникаций в условиях Новосибирска – комплексный подход. В кн. XIII APAM International Seminar “Building and finishing materials – Standards of XXI century”. Новосибирск. 2006. Т. 2. С. 89-91.
10. Richter H., Voigt I., Kuhnert J.-T. Dewatering of ethanol by pervaporation and vapour permeation with industrial scale NaA-membranes // Desalination. 2006. Vol. 199, No 1-3. P. 92-93.
11. Kosacki I., Anderson H.U., Mizutani Y., Ukai K. Nonstoichiometry and electrical transport in Sc-doped zirconia // Solid State Ionics. 2002. Vol. 152-153. P. 431-438.
12. Cai Z., Lan T.N., Wang S., Dokiya M. Supported Zr(Sc)O₂ SOFCs for reduced temperature prepared by slurry coating and co-firing // Solid State Ionics. 2002. Vol. 152-153. P. 583-590.
13. Lee D.S., Kim W.S., Choi S.H. et al. Characterization of ZrO₂ co-doped with Sc₂O₃ and CeO₂ electrolyte for the application of intermediate temperature SOFCs // Solid State Ionics. 2005. Vol. 176. P. 33-39.
14. Bredesen R., Sogge J. Paper presented at the UN Economic Commission for Europe Seminar on Ecological Applications of Innovative Membrane Technology in Chemical Industry, Chem/Sem, 21/R.12, Cetraro, Calabria, Italy, May 1-4, 1996.
15. Зырянов В.В. Многослойные керамические мембраны с селективной проницаемостью // Конструкции из композиционных материалов. 2007. В. 1. С. 32-49.
16. Zyryanov V.V., Uvarov N.F., Sadykov V.A., et al. Mechano-synthesis of complex oxides and preparation of mixed conducting nanocomposites for catalytic membrane reactors // Catal. Today. 2005. Vol. 104. P. 114-119.
17. Зырянов В.В. Наноструктурированная керамика для многослойных керамических мембран. Сбор. Тез. II Всероссийской конференции по наноматериалам «НАНО-2007». Новосибирск. 2007. С. 332.

18. Chu W.-F., Thangadurai V., Weppner W. Ionics – a key technology for our energy and environmental needs on the rise // Ionics. Springer-Verlag. 2006. 10.1007/s11581-006-0015-5.
19. van Hassel B.A. Oxygen transfer across composite oxygen transport membranes // Solid State Ionics. 2004. Vol. 174. P. 253.
20. Zyryanov V.V., Sadykov V.A. Design of multilayer ceramic MIEC membranes // Desalination. 2006. Vol. 199. P. 299-301.
21. Zyryanov V.V., Sadykov V.A., Alikina G.M., Ivanovskaya M.I., Neophytides S. The catalytic membrane reactor for the methane conversion. Book of Abstracts ICCMR7, September 11-14, 2005. Cetraro, Italy. P. 279-282.
22. Zyryanov V.V., Sadykov V.A., Alikina G.M. Design of multilayered ceramic MIEC membranes // Separation Science and Technology. 2007 (in press).
23. Zyryanov V.V. Processing of oxide ceramic powders for nanomaterials using high-energy planetary mills // Interceram. 2003. Vol. 52, No 1. P. 22-26.
24. Park J.-Y., Wachsman E.D. Stable and high conductivity ceria/bismuth oxide bilayer electrolytes for lower temperature solid oxide fuel cells // Ionics. Springer-Verlag. 2006. 10.1007/s11581-006-0010-x.
25. Zyryanov V.V., Sadykov V.A., Uvarov N.F., et al. Mechanochemical synthesis of complex oxides with fluorite and perovskite-related structures and their sintering into nanocomposites with mixed ionic-electronic conductivity // Solid State Ionics. 2005. Vol. 176. P. 2813-2818.
26. Зырянов В.В., Уваров Н.Ф., Садыков В.А. Механохимический синтез сложных твердых растворов на основе ZrO_2 и проводимость нанокерамики // Физ. Хим. Стекла. 2007 (в печати).