



**ВЫПИСКА ИЗ ПРОТОКОЛА № 13-2020**  
заседания Ученого совета Института

г. Новосибирск

29 декабря 2020 г.

**СЛУШАЛИ:** сообщение главного научного сотрудника д.ф.-м.н. Шарыпова О.В. о выполнении первого этапа фундаментальных научных исследований по теме: «Фундаментальные исследования процессов горения и детонации применительно к развитию основ энерготехнологий» – Крупный научный проект по приоритетным направлениям научно-технологического развития в рамках подпрограммы «Фундаментальные научные исследования для долгосрочного развития и обеспечения конкурентоспособности общества и государства» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» по Соглашению о предоставлении гранта от 29.09.2020 № 075-15-2020-806 (Руководитель проекта – академик РАН Маркович Д.М.).

Фундаментальные научные исследования выполняются консорциумом в составе: ИТ СО РАН, ИХКГ СО РАН, ИТПМ СО РАН, ИГиЛ СО РАН, НГУ, ТПУ, ДВФУ, МГУ, ОИВТ РАН, ФИЦ ХФ РАН. За отчетный период (первый этап проекта) ИТ СО РАН (грантополучатель) и соисполнителями (участники консорциума) в полном объеме выполнено задание 2020 года. Достигнуты все показатели, установленные в Соглашении на 2020 год. Получены следующие основные результаты фундаментальных исследований:

1. В свободной и импактной струях в режиме ламинарно-турбулентного перехода зарегистрированы суперструктуры, продольный размер которых составляет десятки диаметров струи. Суперструктуры, воздействуя на фронт диффузионного пламени, создают возможность активного управления параметрами потока и стабильностью горения. Разработан и экспериментально обоснован алгоритм численного моделирования гильберт- и интерференционных изображений фазовых полей.

2. Установлено, что для диффузионного горения одиночной струи водорода, истекающей с дозвуковой скоростью из кольцевого микросопла в затопленное пространство, характерно наличие области «перетяжки» пламени, как для круглых так и для плоских микроструй. Эта область соответствует переходу от ламинарного к турбулентному факелу. Показано, что с ростом скорости коаксиальной струи водорода уменьшается ламинарная область диффузионного факела и горение стабилизируется в турбулентной области факела.

3. Созданы установки для получения и исследования горения двойного гидрата метан-этан и метангидрата. Показано, что зависимость скорости диссоциации газгидратов от скорости вынужденного потока воздуха носит немонотонный характер. Реализованный метод удаления до 90% воды позволяет повысить скорость диссоциации. Зафиксировано двукратное снижение концентрации CO и NO<sub>x</sub> и резкое уменьшение задержки воспламенения при повышении температуры окружающей среды в диапазоне 600-1000°C.

4. На основе численного моделирования процессов турбулентного горения метана в тракте и факеле осесимметричной горелки (7.7 кВт) при аксиальном дутье перегретого водяного пара проведен анализ азротермохимической структуры многокомпонентного потока. Сделаны выводы о влиянии высокоскоростной струи пара на стехиометрические условия в горелке, проанализирована связь разбавления реагирующей смеси водяным паром вблизи фронта пламени с уровнем эмиссии оксидов азота.

5. Экспериментально исследован процесс диффузионного горения жидких углеводородов на примере дизельного топлива при впрыске перегретого водяного пара с управляемыми

расходами топлива и пара, а также коэффициентом избытка воздуха в зоне горения. Получены данные о газовом составе продуктов сгорания и температуре в факеле в зависимости от указанных параметров. Показано, что увеличение расхода воздуха повышает температуру факела и полноту сгорания топлива, но приводит к росту эмиссии NOx.

6. Реализована методика измерения объемного содержания сажи с импульсным нагревом частиц излучением лазера (532 нм или 1064 нм) до 4000 К и регистрацией их излучения высокочувствительной камерой с усилителем яркости. С использованием модели на основе решателя химических реакций, объединенного с пакетом для разрешения гидродинамики OpenFOAM, для различных смесей получены результаты численного моделирования сажеобразования в ламинарных углеводородных пламенах с контролируруемыми начальными условиями.

7. Измерены концентрации различных интермедиатов в предварительно перемешанных пламенах n-гептан/толуол с O<sub>2</sub> при введении добавки 2% пропиленоксида (ПО) и без нее. Показано, что добавка этого типичного оксигената приводит к уменьшению более чем на 30% максимальных концентраций предшественников сажи и ПАУ, а именно бензола, фенола, этилбензола, стирола, индена и нафталина. Выполнен численный расчет химической структуры пламени и проанализированы пути образования предшественников сажи и ПАУ.

8. Получены новые экспериментальные данные по кинетике образования монооксида углерода при высокотемпературном окислении биоспиртов и эфиров в широком диапазоне температуры. Во всех смесях впервые зафиксировано излучение триплета монооксида углерода. Впервые предложен и внедрен в современные кинетические модели под-механизм его формирования и расходования. Разработанные механизмы удовлетворительно описывают все экспериментальные зависимости. Определены элементарные реакции, уточнены константы скоростей реакций.

9. На основе численного моделирования структуры расходящегося пламени в газообразных и дисперсных смесях показано, что генерация акустических волн происходит в результате локального ускорения участков пламени на линейной стадии развития гидродинамически неустойчивого фронта горения, а также на нелинейной стадии – вследствие локального повышения интенсивности горения в складках поверхности пламени. Возникающие поперечные волны усиливаются в пламени по механизму термоакустической неустойчивости.

10. На примере обратного конического метано-воздушного пламени экспериментально получены интегральные характеристики горения в условиях нормальной и реверсной гравитаций. Показана независимость параметров срыва такого пламени от гравитационных условий. Оценены границы перехода такого пламени от формы M к V и обратно для условий нормальной и реверсной гравитации. Обоснован вывод о том, что срыв и переход в безразмерных координатах скорости для заданной смеси происходит при одинаковых параметрах.

11. Разработана новая методика измерения задержки воспламенения с использованием ударной трубы, обеспечивающей начальный нагрев газа до 970 К и перепад давления до 900 атм. За фронтом отраженной ударной волны температура может достигать 10000 К, что превосходит возможности известных стендов. Методика позволяет получать данные о задержке воспламенения при повышенных температурах для ранее не исследованных высокоэнергетических углеводородных соединений (жидких или твердых при нормальных условиях).

12. Экспериментально получены кинетические характеристики процессов при термическом разложении и горении образцов угольного топлива различной степени метаморфизма, отходов углеобогащения, древесных опилок. Сформирован корпус обучающих данных для нейронной сети. Создана оптимальная расчетная модель на основе искусственной нейронной сети для прогнозирования термического разложения угольного топлива. Термогравиметрические кривые моделируются со средним коэффициентом детерминации около 99%.

13. Разработан метод диагностики горения твердого топлива под действием внешнего потока излучения, позволяющий получить данные о положении зон пиролиза, состава продуктов горения и др. в зависимости от расхода газа, угля и мощности излучения. Выполнены термогравиметрические измерения характеристик мелкодисперсного бурого угля. Разработаны схемы использования радиационных горелок для создания контролируемых радиационных потоков для горения угольно-воздушных смесей.

14. Установлены характеристики распыления перспективных топливных композиций (скорости, траектории, компонентный состав и кинетическая энергия капель, размеры факела).

Определены вязкость, показатели расслаиваемости, фрагментации (количество, размеры, площади поверхности, объем облака вторичных фрагментов), характеристики зажигания (предельная температура, времена задержки, предельные давления и др.) и горения (скорости горения, максимальные температуры, газовые выбросы, зольные отложения).

15. Разработаны новые математические модели и созданы современные программные комплексы для исследования многомерных нестационарных течений реагирующих многокомпонентных газовых смесей со скачками уплотнения. Используется несколько детальных кинетических механизмов окисления водорода и углеводородов в смесях с кислородом и инертными добавками. Модернизирован графический интерфейс, обеспечивающий управление условиями задач и методами решения для проведения параллельных вычислений на суперкомпьютерах.

16. Для определения относительной детонационной способности (ДС) топливно-воздушных смесей (ТВС) на основе газообразных и жидких горючих методами перехода горения в детонацию (ПГД) и перепуска стационарной детонации в полуограниченные каналы созданы три экспериментальные установки, не имеющие мировых аналогов. В системах типа газообразный окислитель – жидкое топливо в зависимости от условий зарегистрированы два типа ПГД, а также режимы высокоскоростного и низкоскоростного горения.

17. Впервые реализована непрерывная многофронтная детонация смеси авиационный керосин – холодный воздух в проточной кольцевой камере сгорания диаметром 0.5 м с заужением выходного сечения до трех раз. В диапазоне расхода воздуха 11.8-34 кг/с и коэффициента избытка горючего 0.88-1.8 получены двух- и четырехволновые детонационные режимы с частотой вращения встречных поперечных волн 850-3090 Гц.

18. Определены кинетические параметры и рассчитаны необходимые при разработке новых энергетических технологий газодинамические (давление, температура, плотность, состав продуктов) и энергетические (критическая энергия инициирования детонации, удельное энерговыделение) характеристики смеси  $\text{CO}+\text{H}_2+\text{Air}$  при различных начальных давлениях, температурах, концентрациях топлива и соотношениях компонент синтез-газа. Обнаружен сильный промотирующий эффект добавок  $\text{H}_2$  на детонационную кинетику смесей  $\text{CO}+\text{Air}$ .

19. Разработана двухстадийная обобщенная модель химической кинетики детонационного сгорания смеси  $\text{CO}+\text{H}_2+\text{O}_2+\text{N}_2$ , рассчитана 2D ячеистая структура детонации при различной концентрации компонентов смеси. Экспериментально определены параметры и структура и динамика волн горения и детонации в системах, содержащих метан и взвесь мелкодисперсного угля. Показано, что угольная пыль ослабляет детонационную волну в газовой стехиометрической смеси и определяет характер отраженной детонационной волны.

Полученные результаты соответствуют заданию на 2020 год, - развиты измерительные методики, созданы установки, проведены экспериментальные и теоретические исследования физико-химических процессов. Результаты фундаментальных исследований обладают принципиальной новизной, вносят вклад в мировую науку в области исследования горения и детонации (механика реагирующих сред, теплофизика, химическая кинетика), они ориентированы на развитие технологий, в том числе на совершенствование энергоустановок, двигателей, повышение технической и экологической безопасности.

ПОСТАНОВИЛИ: Научно-исследовательскую работу по теме «Фундаментальные исследования процессов горения и детонации применительно к развитию основ энерготехнологий» по Соглашению о предоставлении гранта от 29.09.2020 № 075-15-2020-806 считать принятой и выполненной в установленный срок в полном соответствии с условиями предоставления гранта.

Председатель Ученого совета  
академик РАН Д.М. Маркович

Ученый секретарь  
к.ф.-м.н. М.С. Макаров

М.П.

