



Министерство науки  
и высшего образования  
Российской Федерации



*Российская Академия Наук*

## Фундаментальные исследования процессов горения и детонации применительно к развитию основ энерготехнологий

(крупный научный проект, тематика: энергетика, механика  
и машиностроение 2020-2022 гг.)

Блок 1. Фундаментальные исследования физико-химических процессов в многофазных многокомпонентных средах при горении различных видов топлива, направленные на развитие научных основ создания перспективных высокоэффективных и безопасных технологий производства тепловой энергии и усовершенствованных двигателей.

Блок 2. Фундаментальные исследования закономерностей возникновения и устойчивости режимов детонационного горения в сложных условиях, направленные на развитие научных основ создания принципиально новых типов реактивных двигателей и обеспечения взрывобезопасности технологий добычи и использования топлива.

### **Фундаментальные исследования в рамках КНП направлены на изучение:**

нестационарных процессов переноса в одно- и многофазных многокомпонентных реагирующих системах, закрученных турбулентных потоках, влияния физических факторов на кинетику и показатели горения топливных смесей; динамики детонационных режимов в газовых (моно- и многотопливных) смесях и многофазных системах, потоках со сложной пространственной структурой.

### **Будут обоснованы:**

детальные химико-кинетические модели, свойства перспективных видов топлива и новые методы управления горением газофазного и дисперсного органического топлива, составных смесей, в том числе на основе создания нейросетевых алгоритмов; условия инициирования, срыва и восстановления детонации, методы эффективного подавления детонации и горения неоднородных, многокомпонентных и многофазных горючих смесей.

### **Планируемые результаты фундаментальных исследований ориентированы на:**

- создание перспективных технологий в области тепловой энергетики и энергомашиностроения (повышение эффективности производства энергии с использованием органического топлива, горелочные устройства, топки котлов, ГТУ), двигателестроения (ДВС, детонационные ВРД);
- использование новых видов топлива (бинарные, композиционные, эндотермические);
- повышение пожаро- и взрывобезопасности технологий (ингибирование, водородная энергетика, угледобыча);
- снижение производства токсичных продуктов сгорания (сажа, ПАУ, оксиды азота и углерода).

### **Исследования соответствуют приоритетным направлениям научно-технологического развития РФ:**

- переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности использования углеводородного сырья и формирования новых источников энергии;
- противодействие техногенным угрозам;
- переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям;
- развитие транспорта для обеспечения связанности территории РФ, лидерства в международной транспортной логистике, освоения и использования воздушного пространства, Мирового океана, Арктики;
- эффективный ответ на большие вызовы, связанные с антропогенным воздействием на окружающую среду.

## СОСТАВ КОНСОРЦИУМА



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук (ИХКГ СО РАН)



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГиЛ СО РАН)



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (ФИЦ ХФ РАН)



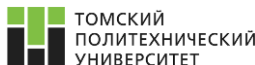
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ)



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ)



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет» (ДВФУ)



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)



# Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

(головной исполнитель КНП)



Основан в 1957 году  
в числе первых Институты СО АН СССР

В настоящее время: ведущая научная организация I категории;  
4 академика РАН, 2 чл.-корр. РАН, 6 проф. РАН, 62 доктора и 109 кандидатов наук,  
246 научн.сотр. (33% до 35 лет, средний возраст 50 лет); участие в 6 «мегагрантах»

Основные направления исследований:

теория теплообмена и физическая гидрогазодинамика,  
теплофизические основы создания нового поколения энергетических  
и энергосберегающих технологий и установок,  
теплофизические свойства веществ,  
теплофизические аспекты водородной энергетики

Директор ИТ СО РАН Маркович Д.М. (Руководитель КНП), академик РАН, д.ф.-м.н., профессор,  
лауреат Государственной премии РФ (2020), Премии Правительства РФ (2014),  
Международной премии НАН Беларуси им. академика А.В. Лыкова (2014)

Научный руководитель ИТ СО РАН Алексеенко С.В., академик РАН, д.ф.-м.н., профессор,  
лауреат Премии Правительства РФ (2012), Международной премии НАН Беларуси  
им. академика А.В. Лыкова (2014), Международной энергетической премии «Глобальная  
энергия» (2018), Премии им. академика Г.Г. Черного (2019)

Ученый секретарь КНП Шарыпов О.В., д.ф.-м.н., заместитель директора,  
лауреат Международной премии НАН Беларуси им. академика А.В. Лыкова (2014)

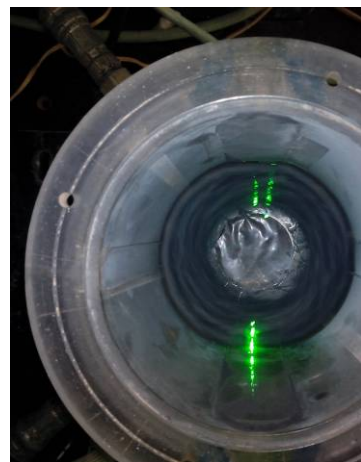
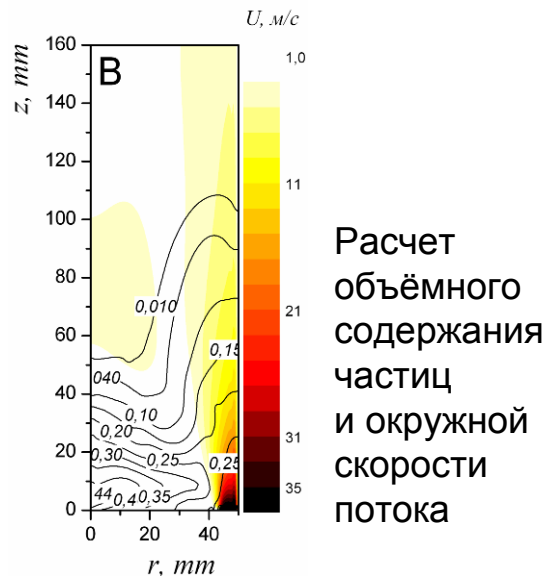
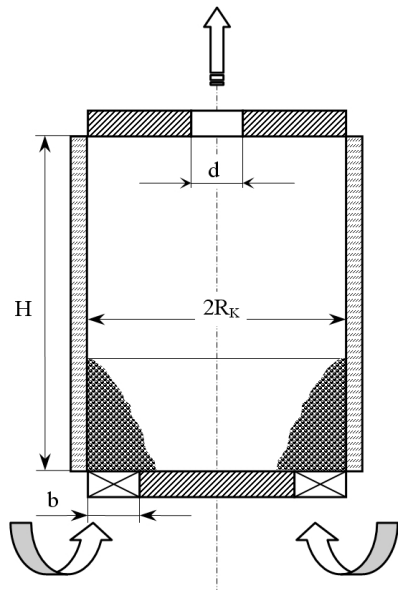
В составе исполнителей проекта: 9 докторов и 11 кандидатов наук, 2 аспиранта



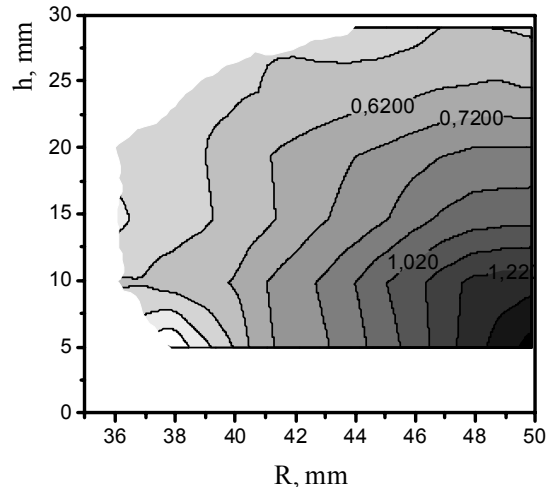


# ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА И РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ В ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ

Вихревая камера с кипящим центробежным слоем



ЛДА-диагностика  
закрученного  
двухфазного потока



Факельный и беспламенный  
режимы горения  
(пропано-воздушная смесь)



Горение богатых и бедных смесей

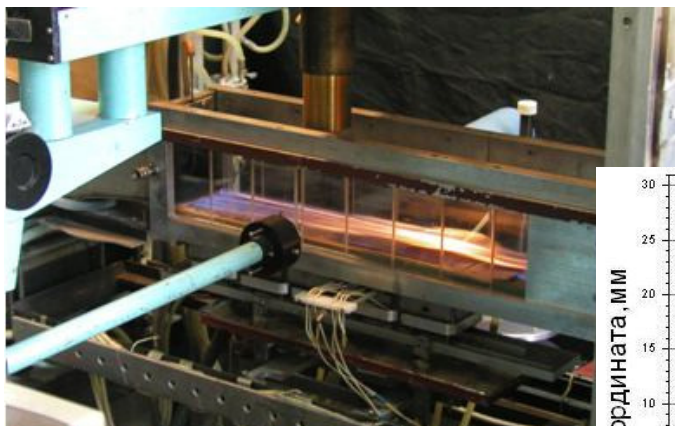


Ячеистое пламя  
(богатая смесь  
пропан-бутан +  
воздух)

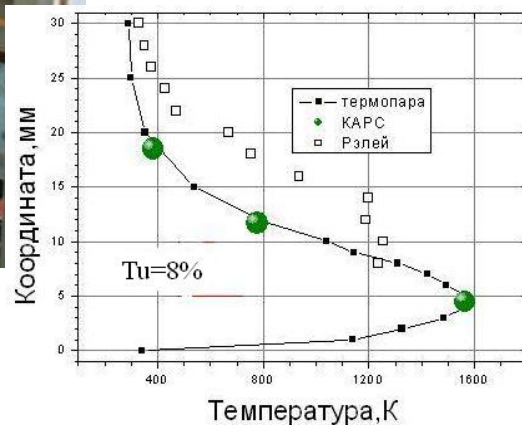
Boyarshinov B.F., Fedorov S.Yu. Experimental study of momentum transfer in a cellular flame of rich and lean propane-butane/air mixture // Thermophysics and Aeromechanics. – 2020. – Vol. 27, No. 3. – P. 409-416. DOI: 10.1134/S0869864320030099



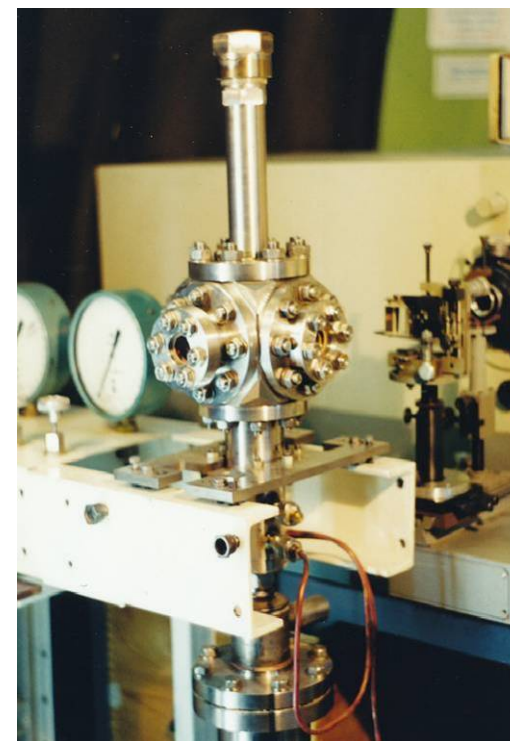
# Оптическая диагностика реагирующих потоков, методы КАРС, рэлеевское рассеяние света



Пограничный слой с испарением  
и горением этанола



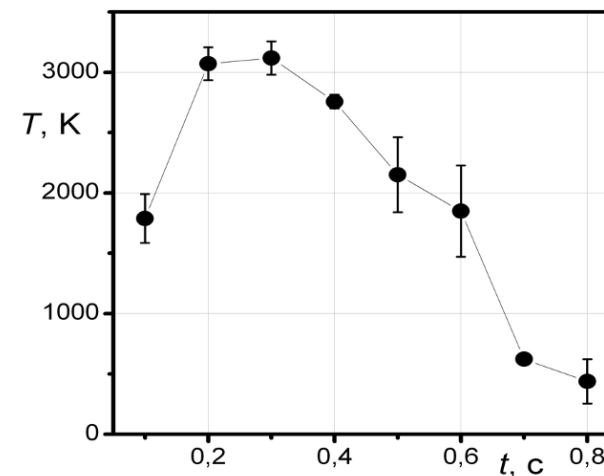
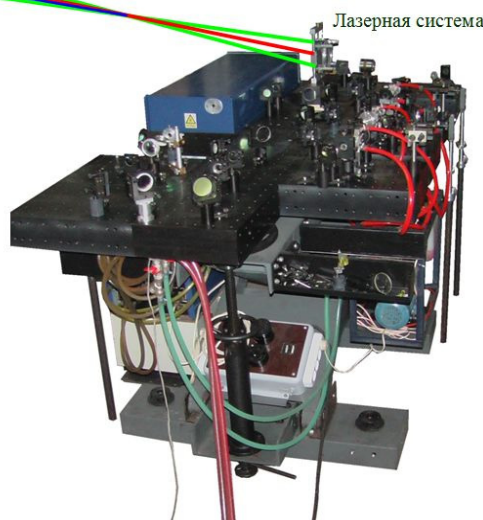
# Горение твердого топлива (до 25 атм)



Регистрирующая система



Лазерная система



# Диагностика диффузионного пламени методами гильбертовой оптики

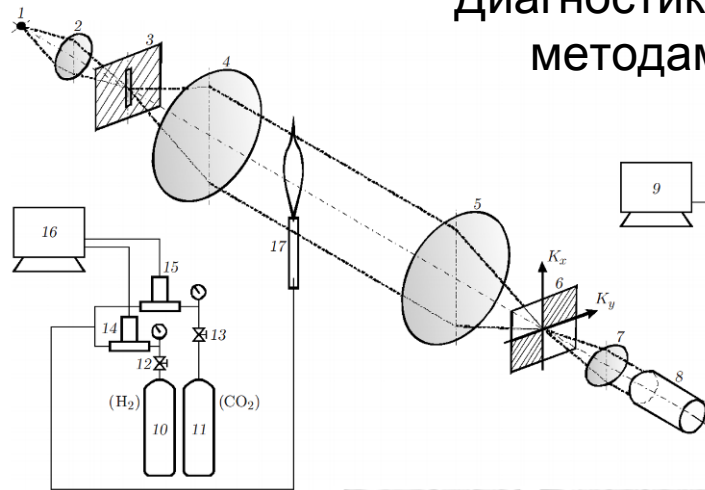
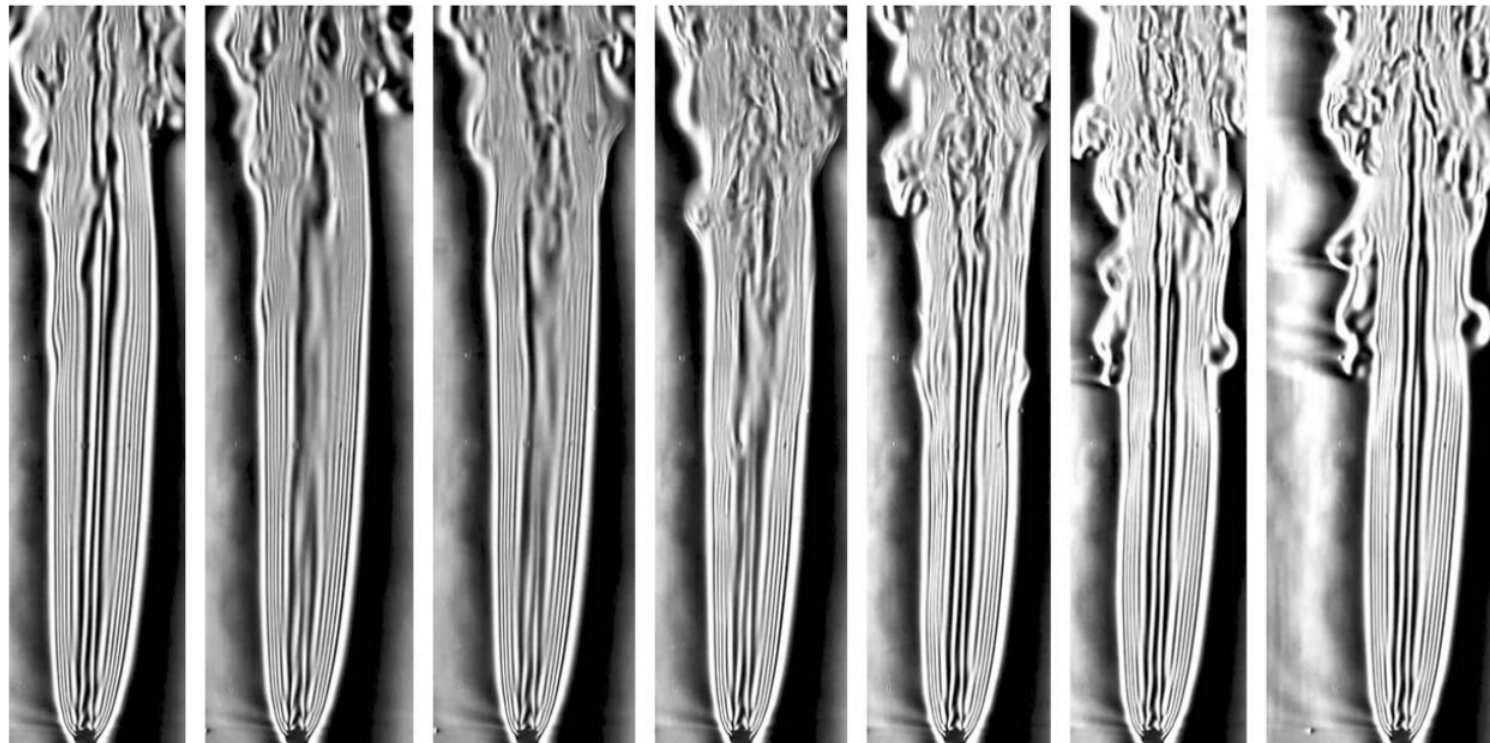


Схема установки  
для  
гильберт-  
визуализации  
пламени

Гильберт-  
визуализация  
горения в воздухе  
струи смеси  
CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> (44 об.%)  
при Re=1800,  
частота кадров  
50 Гц.

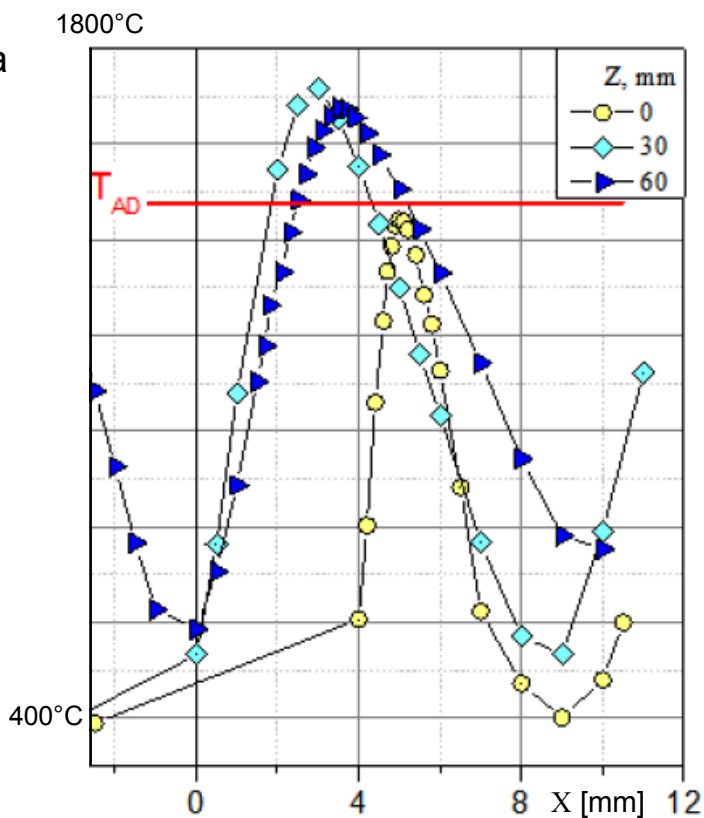




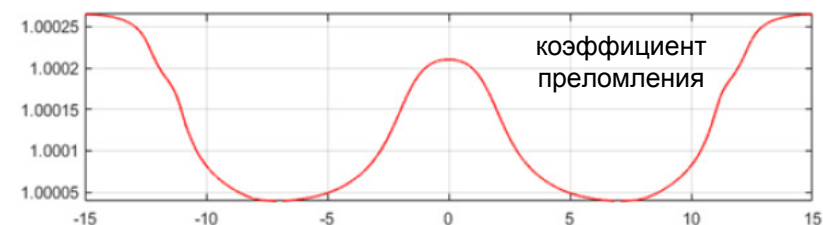
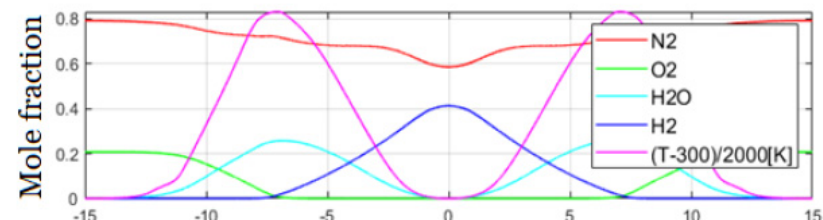


# Методы реконструкции пространственного распределения химического состава и температуры в пламени (гильберт-оптика)

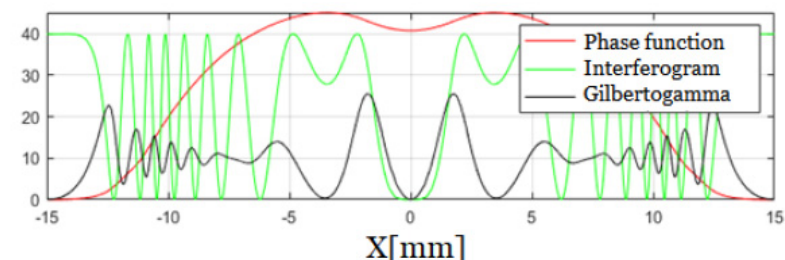
Трёхцветная гильбертограмма



Термопарные измерения



оптические характеристики интерферограммы и гильбертограммы



Оптические измерения (гильберт-оптика)

O<sub>2</sub> – по осевому каналу,  
H<sub>2</sub> – по кольцевому каналу

Леманов В. В., Лукашов В. В., Шаров К. А. Переход к турбулентности через перемежаемость в инертных и реагирующих струях // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2020. – № 6. – С. 50–59. DOI: 10.31857/S0568528120060080

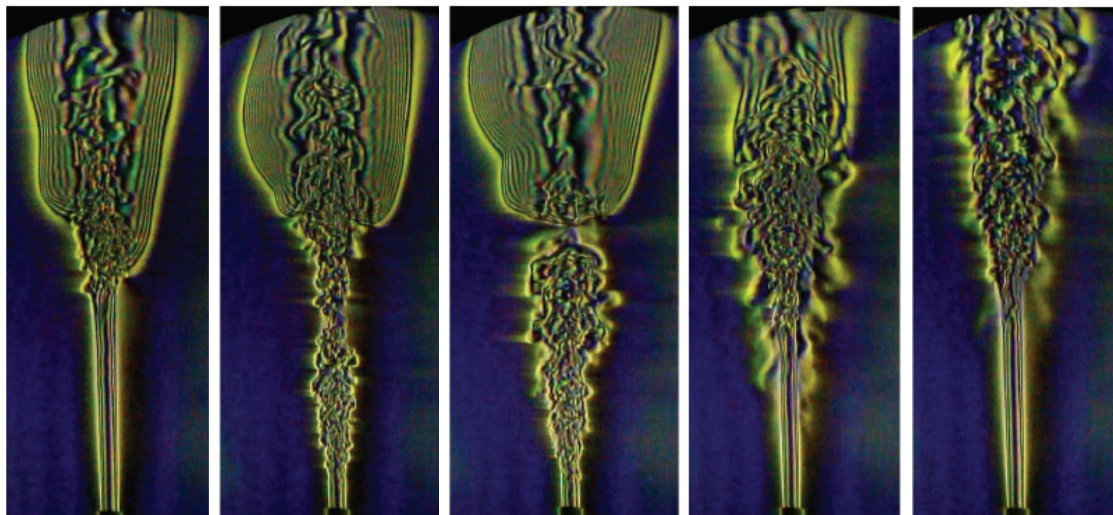
Arbuzov V.A., Arbuzov E.V., Dubnishchev Yu.N., Zolotukhina O.S., Lukashov V.V. Recovery of the Temperature Field in the Case of Combustion of Premixed Propane-Air Mixtures by Methods of the Hilbert Optics // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2020. – Vol. 56, No. 1. – P. 61–67. DOI: 10.3103/S8756699020010082



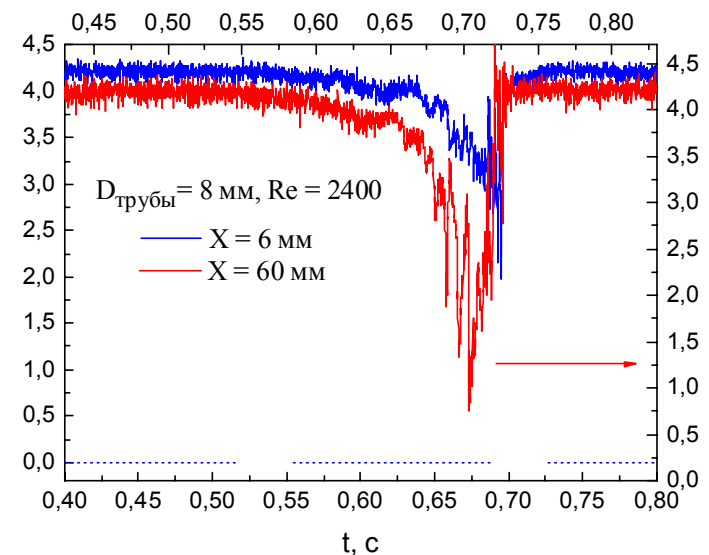
## Влияние крупномасштабных структур на горение в струе

**КНП-2020:** В свободной и импактной струях в режиме ламинарно-турбулентного перехода зарегистрированы суперструктуры, которые, воздействуя на фронт диффузионного пламени, создают возможность активного управления параметрами потока и стабильностью горения. Регистрация суперструктур в импактной струе проведена с использованием метода PIV для измерения распределения скорости в нестационарном потоке (частота видеосъемки до 7 кГц). С применением методов гильберт-оптики исследована структура водородно-воздушного пламени, показана реализуемость мультиволновой оптической диагностики фазовой структуры и поля температуры в осесимметричном пламени. Разработан и экспериментально обоснован алгоритм численного моделирования гильберт- и интерференционных изображений фазовых полей.

Продольный размер **суперструктуры** («упаковка» продольных вихрей) составляет десятки диаметров струи, Они наблюдаются в трубах в условиях ламинарно-турбулентного перехода [Никитин, 2017, Marusich, 2020]. Для затопленной струи – обнаружены впервые.



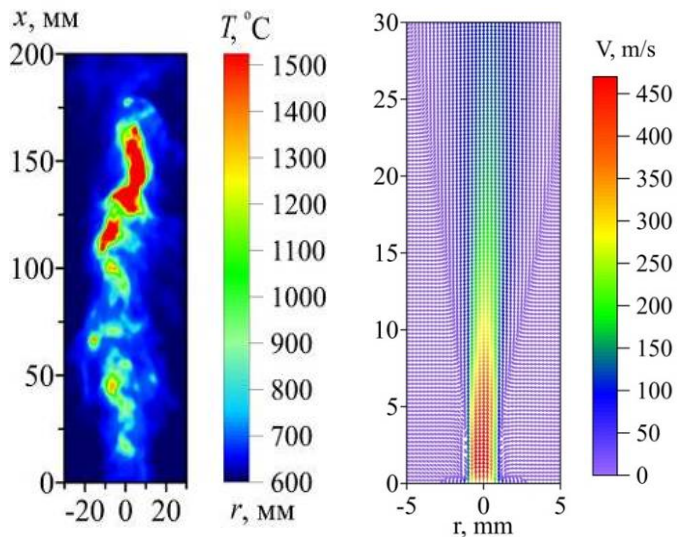
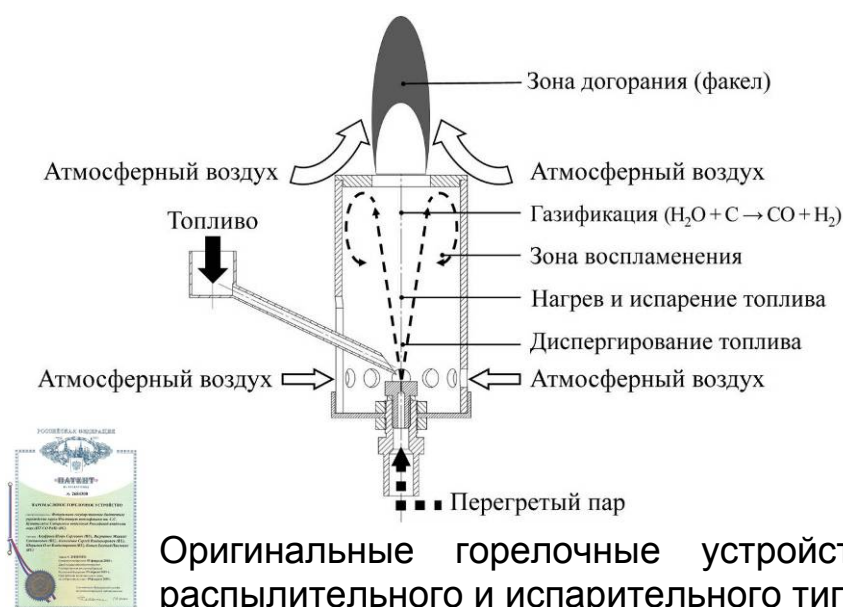
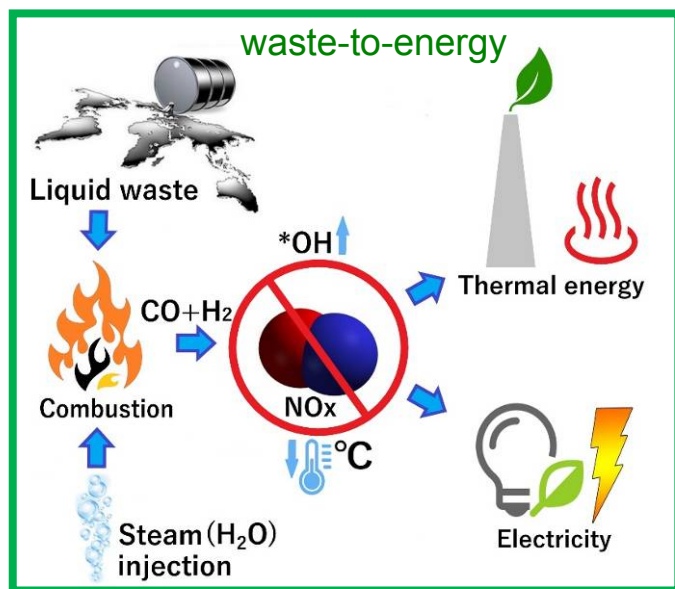
Гашение диффузионного горения в струе  $\text{CO}_2 + \text{C}_3\text{H}_8$  (46 об.%) в воздухе при наличии суперструктур в режиме, соответствующем ламинарно-турбулентному переходу ( $\text{Re}=2966$ )



Регистрация продольной скорости (м/с) в потоке с суперструктурой (PIV)



# ГОРЕНИЕ НЕКОНДИЦИОННЫХ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ И ОТХОДОВ В ПОТОКЕ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА

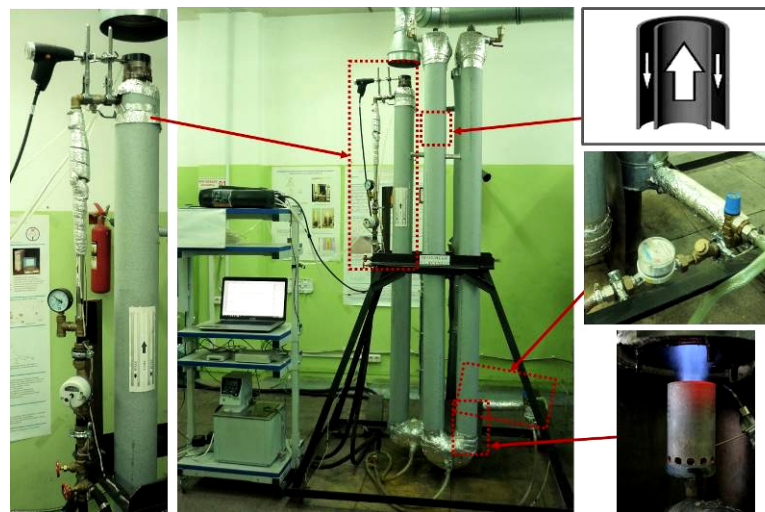


ИК-термография

PIV-диагностика



Теневая фотография

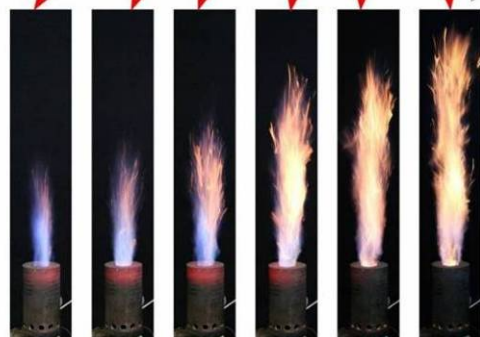
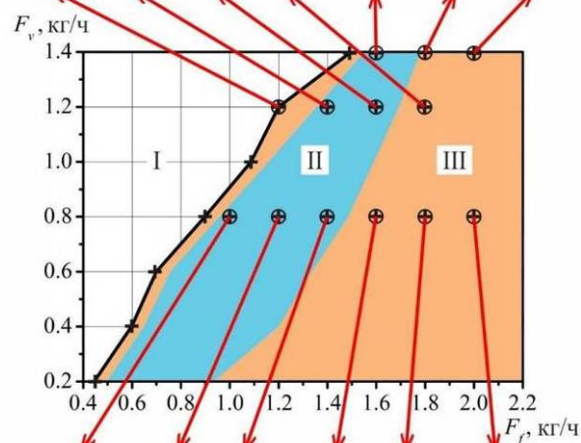


Калориметрия, газовый анализ



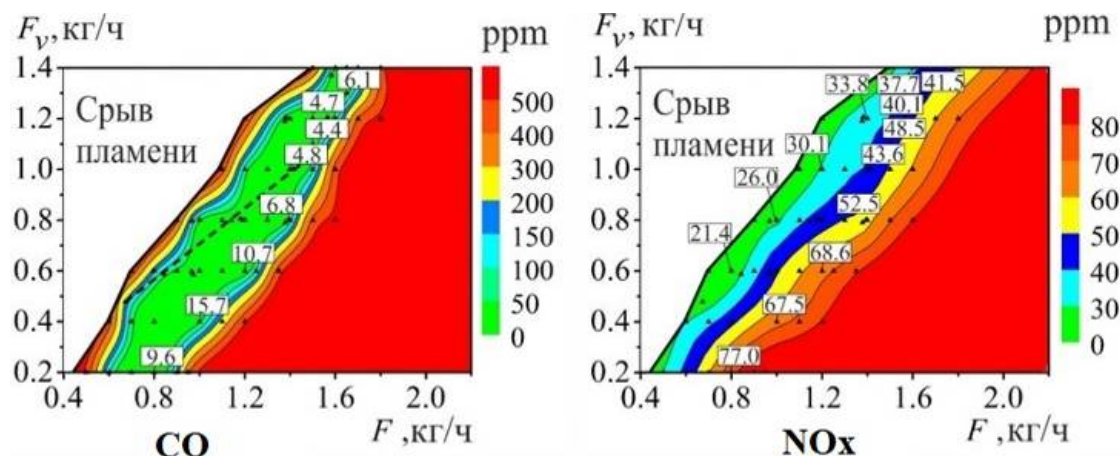


## УПРАВЛЕНИЕ ГОРЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРА



Карта режимов: I – срыв пламени;  
II – устойчивого горения;  
III – неполное сгорание

Низкоэмиссионный режим горения  
при относительном расходе пара  $F_v / F = 0,8$ :  
[CO] < 10 ppm ; [NOx] = 20-70 ppm



Подача пара в зону горения жидких углеводородов приводит не только к повышению интенсивности горения, но и позволяет управлять эмиссией токсичных компонентов (CO, NOx). Показано, что основным управляющим параметром служит отношение массовых расходов пара ( $F_v$ ) и топлива ( $F$ ).

По сравнению с подачей воздуха использование пара обеспечивает снижение температуры факела и значительное уменьшение производства оксидов азота (на единицу тепловой энергии) при высокой полноте сгорания топлива.

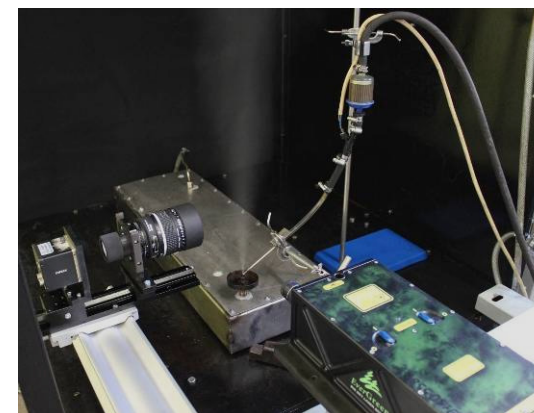
Исследования проведены на оригинальных горелочных устройствах испарительного и распылительного типов (~10 кВт). Показатели разработанных горелочных устройств с запасом удовлетворяют самым высоким международным экологическим нормативам.

Направление дальнейших исследований: «масштабирование» эффекта для условий работы энергетических газовых турбин.

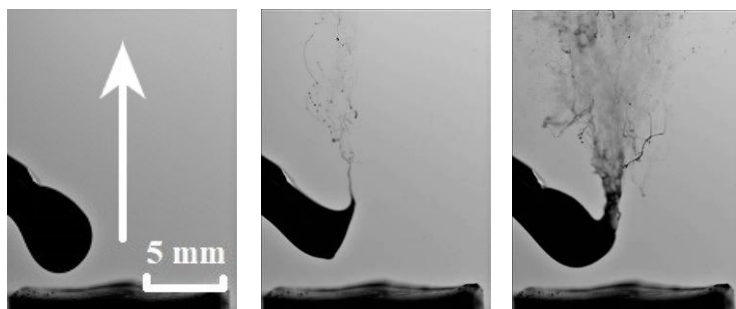


## РАСПЫЛЕНИЕ ТОПЛИВА СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУЕЙ ПАРА

**КНП-2020:** 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.



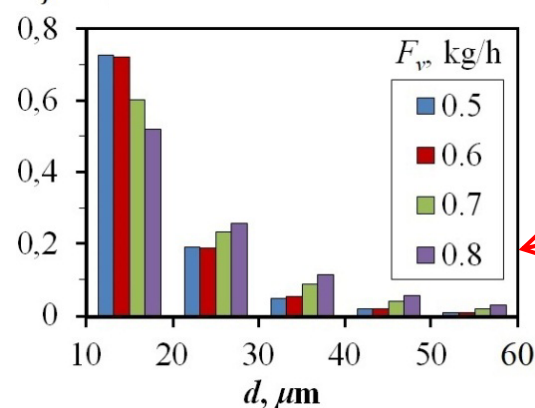
Оптические измерения  
(теневого метод, SP)



Распыление  
высоковязкого  
топлива  
(отработанное  
масло)

$$\frac{\sum_i n_i}{\sum_j N}$$

Дисперсный  
состав капель  
топлива



Газокапельная  
затопленная струя

Anufriev I.S. // Renewable & sustainable energy reviews, 138 (2021).  
DOI: 10.1016/j.rser.2020.110665 **Q1 IF=12,11**

Anufriev I.S., Alekseenko S.V., Sharypov O.V., Kopyev E.P. // Fuel, 254 (2019). DOI: 10.1016/j.fuel.2019.115723 **Q1 IF=5,578**

Anufriev I.S., Kopyev E.P. // Fuel processing technology, 192 (2019).  
DOI: 10.1016/j.fuproc.2019.04.027 **Q1 IF=4,982**

Kopyev E.P., Anufriev I.S., Shadrin E.Yu., et al. // Infrared physics & technology, 102 (2019). DOI: 10.1016/j.infrared.2019.103028 **Q2 IF=2,379**

Anufriev I.S., Shadrin E.Yu., Kopyev E.P., et al. // Journal of engineering thermophysics, 29 (2020). DOI:10.1134/S1810232820040013 **Q2 IF=1,163**

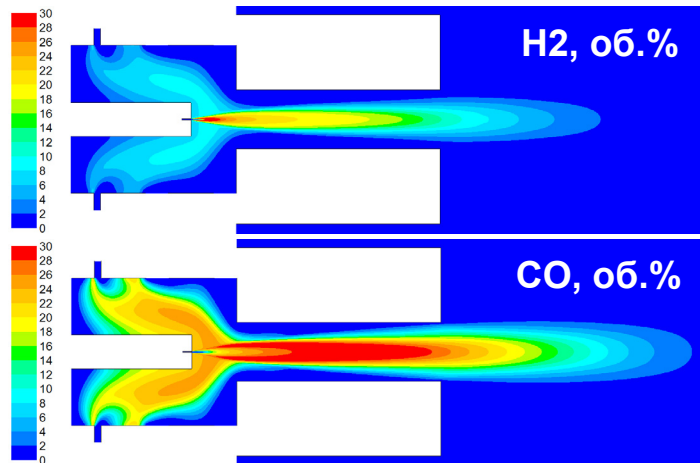
Anufriev I.S., Shadrin E.Yu., Kopyev E.P., et al. // Applied thermal engineering, 163 (2019). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114400 **Q1 IF=4,725**

Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Dekterev A.A., et al. // International journal of heat and fluid flow, 77 (2019). DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.04.013 **Q2 IF=2,073**

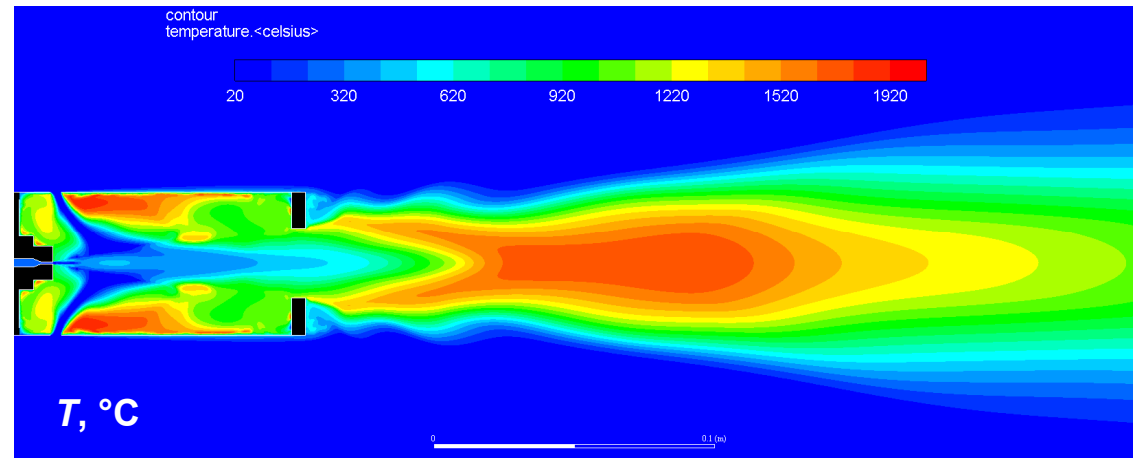


## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ С ПАРОМ

Эйлерово описание многокомпонентной сплошной среды в осесимметричной постановке, локально-сверхзвуковой турбулентный реагирующий поток, RANS, URANS (SST- $k-\omega$  или  $k-\varepsilon$  модели), расчеты с использованием CFD-пакета FLUENT



Паровая газификация жидкого топлива, с образованием синтез-газа (испарительная горелка,  $M=1,3$ )



Низкоэмиссионное горение дизельного топлива, распыляемого струей пара:  
 $F_v / F = 0,8$ ,  $M=1,5$ ,  $[NO_x] = 33.5 \text{ мг/м}^3$  (в горелке)

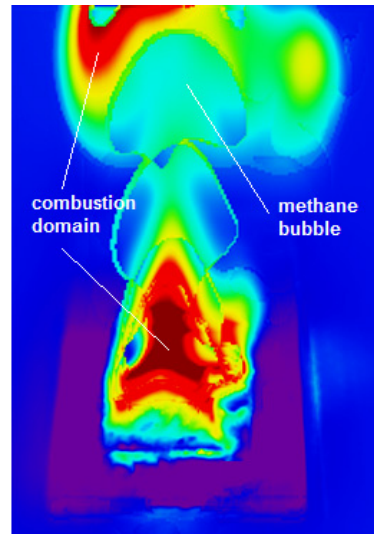
**КНП-2020:** На основе численного моделирования процессов турбулентного горения метана в тракте и факеле осесимметричной горелки (7.7 кВт) при аксиальном дутье перегретого водяного пара проведен анализ аэротермохимической структуры многокомпонентного потока. Сделаны выводы о влиянии высокоскоростной струи пара на стехиометрические условия в горелке, проанализирована связь разбавления реагирующей смеси водяным паром вблизи фронта пламени с уровнем эмиссии оксидов азота. Исследования выполнены с применением комплексной физико-математической модели турбулентной аэродинамики, процессов тепломассопереноса и газофазного горения (в рамках флеймлет-модели с учетом химической кинетики по С1-механизму для метано-воздушных пламен), лучистого теплопереноса, процессов образования сажи и оксидов азота, в условиях недостатка окислителя в горелочном тракте.



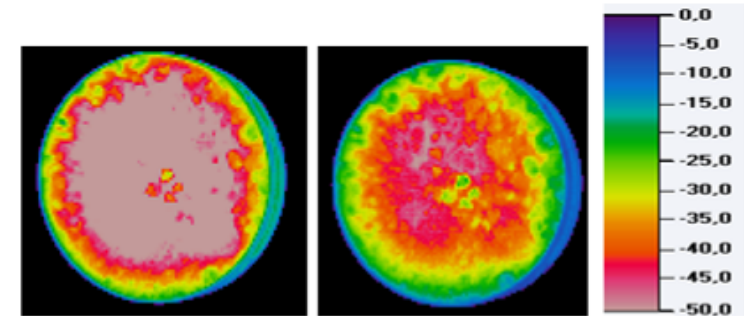


# ГОРЕНИЕ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА

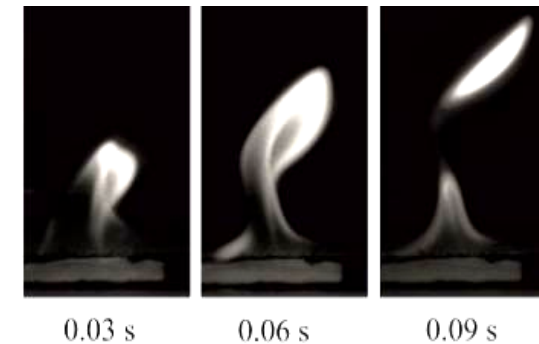
Цель исследований: повышение эффективности хранения и транспортировки гидрата метана, эффективности горения и экологических показателей.



ИК-термография поверхности



Измерение скорости пламени



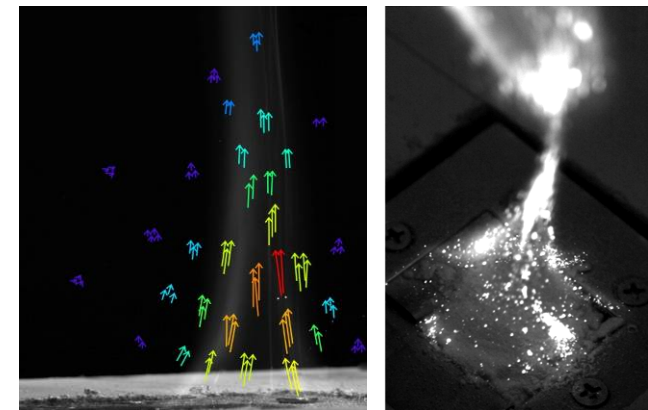
Установка по горению газовых гидратов:

Измерение скорости диссоциации  
(гравиметрический метод)

Измерение состава продуктов горения  
(хроматографический метод)

В 2013-2020 г. опубликованы 17 статей в журналах Q1 и Q2 (Applied Energy, Energy, Fuel, Combustion and Flame, Journal of CO2 Utilization, Fuel Processing Technology, Journal of Natural Gas Science and Engineering, Energy & Fuels, Entropy, Energies)

Измерение скорости потоков (PTV)





**КНП-2020:** 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 NOx и резкое уменьшение задержки воспламенения при повышении температуры окружающей среды в диапазоне 600-1000°C.

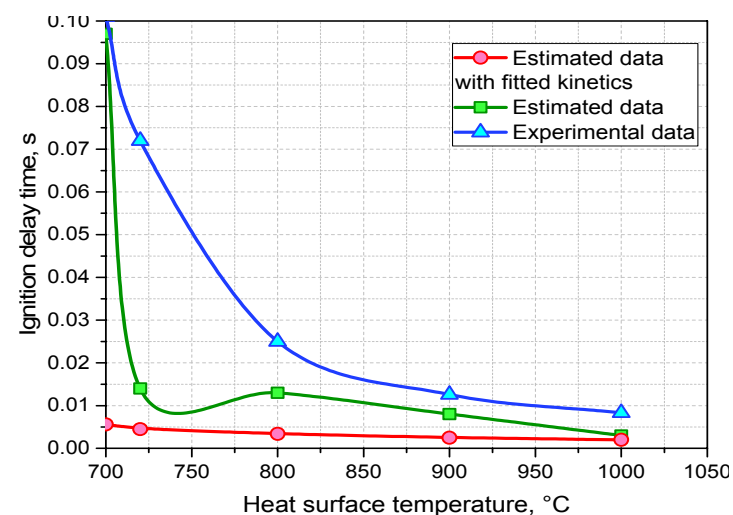
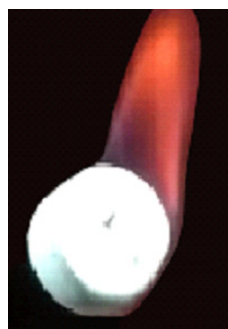
Синтезируемые газгидраты использовались в виде порошка частиц 0,3-0,5 мм и прессованных таблеток 10-20 мм. Диссоциация и горение газгидратов изучалось в различных режимах (температура до 1000°C, скорость потока воздуха до 4 м/с) с применением методов термогравиметрии, газового анализа, ИК-термографии). Удаление воды обеспечивалось за счет естественного стекания пленки и применения поглощающего материала.

Получены расчётные зависимости времени задержки воспламенения от температуры внешней среды (в муфельной печи).

Объемная доля H<sub>2</sub>, CO и NO<sub>x</sub> в продуктах сгорания двойного гидрата метан-этан в муфельной печи

T, °C	H <sub>2</sub> , %	CO, %	NO <sub>x</sub> , %	SO <sub>x</sub> , %
600	9,2	8.1	0.025	-
700	6,9	7.4	0.022	-
800	6,8	6.2	0.025	-
900	5,9	5.5	0.015	-
1000	5,2	4.5	0.015	-

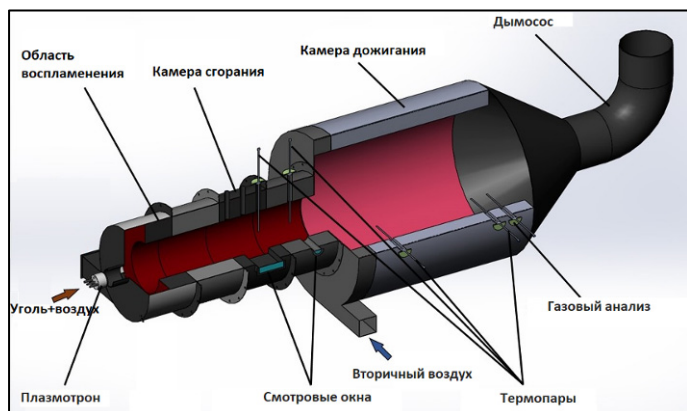
Горение прессованного гидрата метана





# ГОРЕНИЕ И ГАЗИФИКАЦИЯ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩЕГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Экспериментальный тепловой  
стенд мощностью 5 МВт

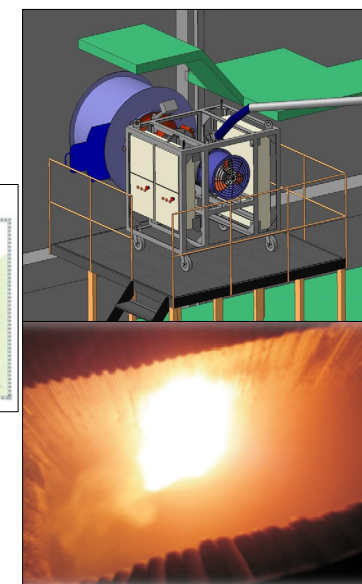


Высоковольтное  
плазменное запальное  
устройство для растопки  
и поддержания горения  
угольного топлива  
и отходов в котлах



Безмазутная растопка  
угольного котла ТЭЦ-10  
ПАО «Иркутскэнерго»

Технология  
использования угля  
микрпомола  
(механоактивация)



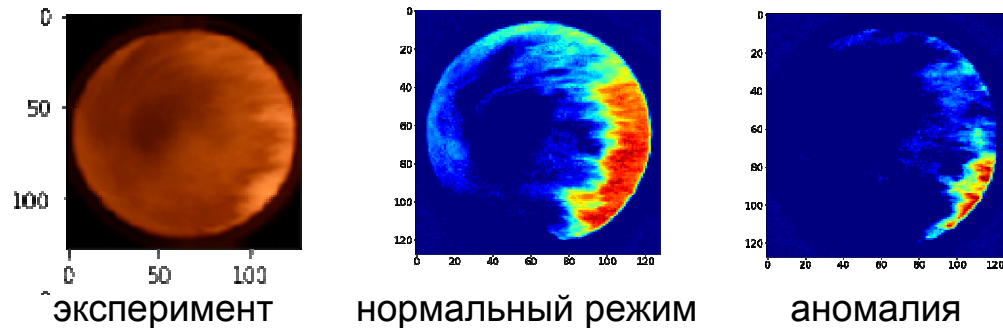
**КНП-2020:** На основе синхронного термического анализа определены температурные характеристики и кинетические параметры процессов при термическом разложении, воспламенении и горении различных видов дисперсного твердого топлива, измельченного в высоконапряженных мельницах: образцов угольного топлива различной степени метаморфизма, отходов углеобогащения, древесных опилок. Сформирован корпус обучающих данных для нейронной сети (НС), создана оптимальная расчетная модель на основе искусственной НС для прогнозирования термического разложения угольного топлива (термогравиметрические кривые моделируются с коэффициентом детерминации 95-99%).



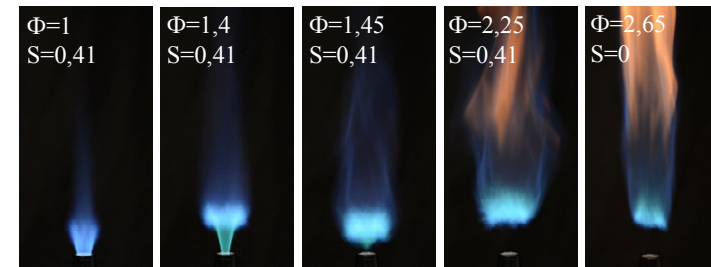


## Модель нейронной сети для диагностики режимов работы котла

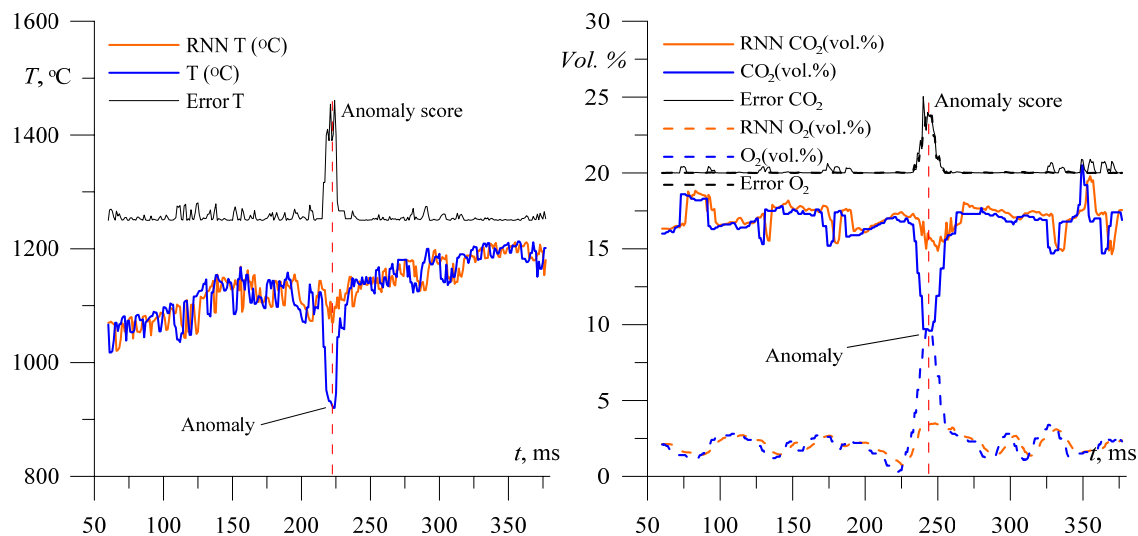
На угольном стенде 5 МВт исследованы методы компьютерного зрения, в частности глубоких нейронных сетей для обнаружения аномальных режимов горения угольной пыли в камере сгорания, соответствующих низким значениям коэффициента избытка воздуха



Обучение НС проводилось на газовом факеле с вариацией коэффициента избытка воздуха и закрутки (12 режимов)



Экспериментальные данные (синие кривые) и предсказания рекуррентной НС (красные кривые) температурного и газового анализа на тепловом стенде 1 МВт



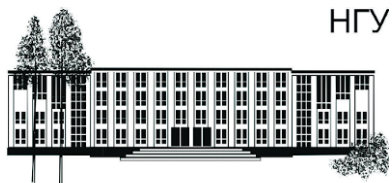
Abaimov N.A., Butakov E.B., Burdukov A.P., et al. // Fuel, 271 (2020), 117487. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117487 **Q1**

Butakov E.B., Burdukov A.P. // Thermal Science, 2020.

DOI: [10.2298/TSCI200601211B](https://doi.org/10.2298/TSCI200601211B)

Абдуракипов С.С., Бутаков Е.Б. // Автометрия. – 2020. – Т. 56, № 6.

**N\*** Новосибирский  
государственный  
университет  
\*НАСТОЯЩАЯ НАУКА



НГУ

Основан в 1958 г.

# Новосибирский национальный исследовательский государственный университет



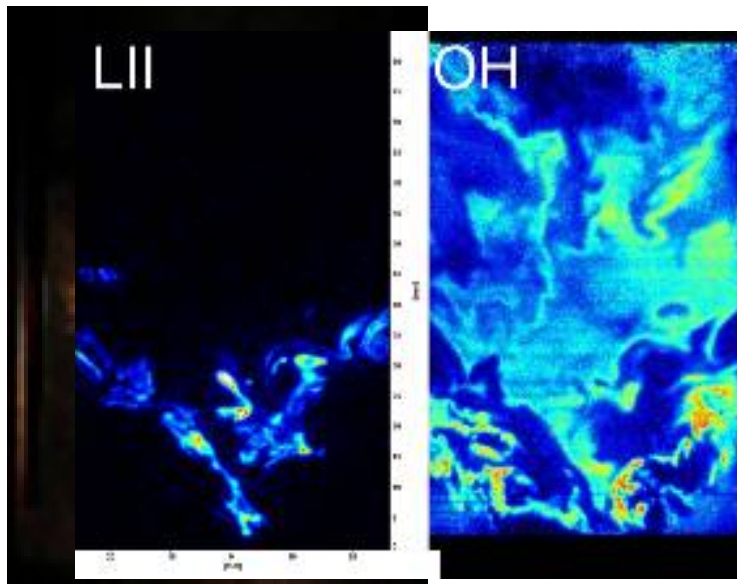
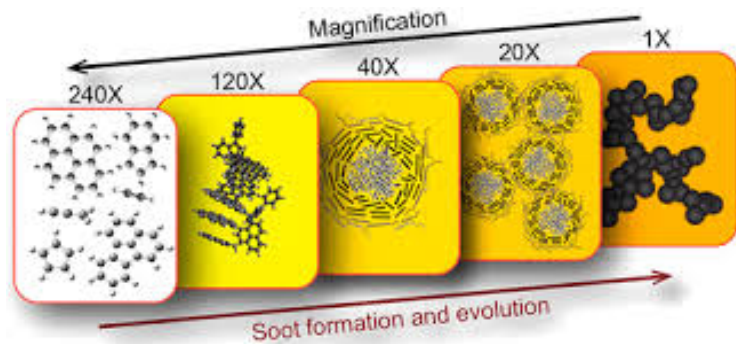
Три института и шесть факультетов, Высший колледж информатики и Специализированный учебно-научный центр (ФМШ), 110 кафедр, более 8 тысяч студентов, 449 чел в аспирантуре и ординатуре, 336 профессоров, 925 доцентов, 80% ППС НГУ из научных институтов

**КНП-2020:** Для ламинарного режима горения углеводородно-воздушных семей на основе метода лазерно- индуцированной инкадесценции 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. Исследования выполнены в тесной кооперации с сотрудниками ИТ СО РАН на современной приборной базе НГУ и ИТ СО РАН.

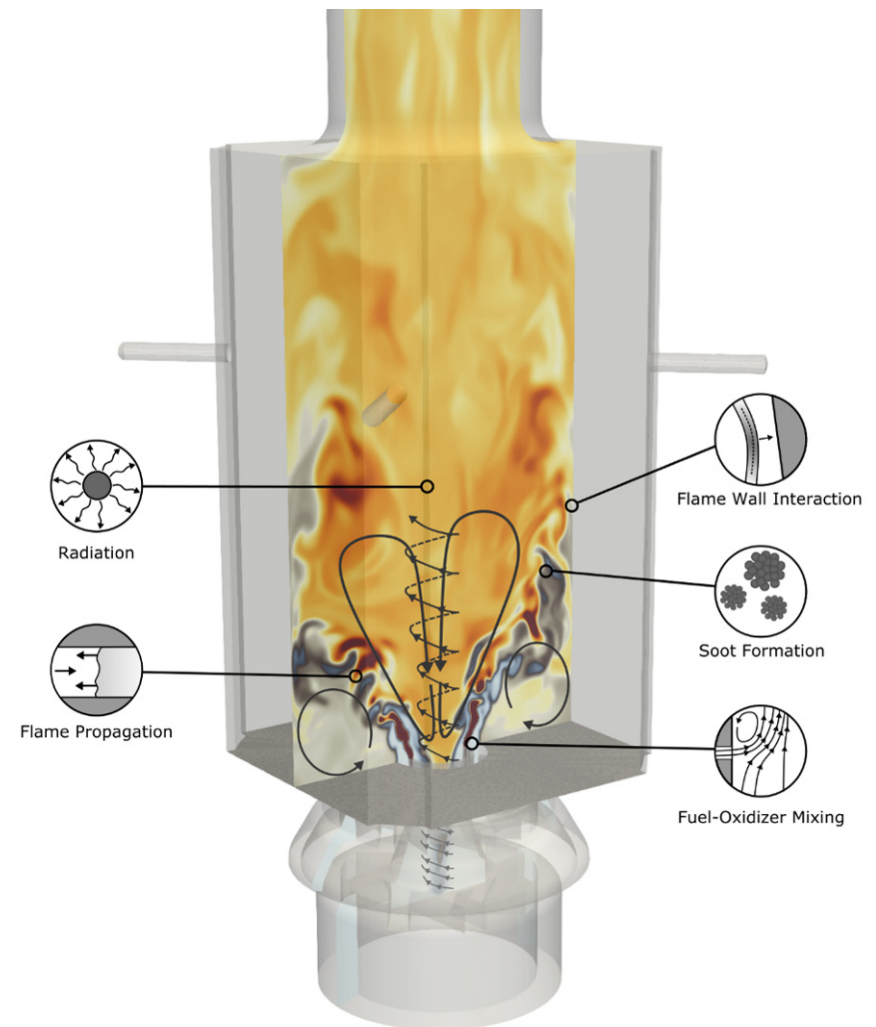
С использованием модели на основе решателя химических реакций, объединенного с пакетом для разрешения гидродинамики OpenFOAM, для различных смесей получены результаты численного моделирования сажеобразования в ламинарных углеводородных пламенах с контролируемыми начальными условиями. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными подтверждает адекватность используемой модели. Программные модули написаны на языке C++, хорошо согласуются между собой и обеспечивают возможность распараллеливания расчета по протоколу MPI.

В составе исполнителей проекта: 4 доктора и 3 кандидата наук, 4 аспиранта, 2 лауреата Премии Правительства РФ, лауреат Премии им. академика Г.Г. Черного

# САЖЕОБРАЗОВАНИЕ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ



Лазерные оптические методы диагностики



Микро- и наночастицы сажи наносят вред здоровью человека, влияют на глобальное потепление, наряду с  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ . Диагностика и моделирование процессов образования и сгорания сажевых частиц становятся все более актуальными с повышением экологических требований.

# Методы измерения полей скорости, концентрации, температуры

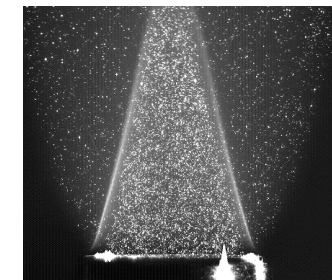
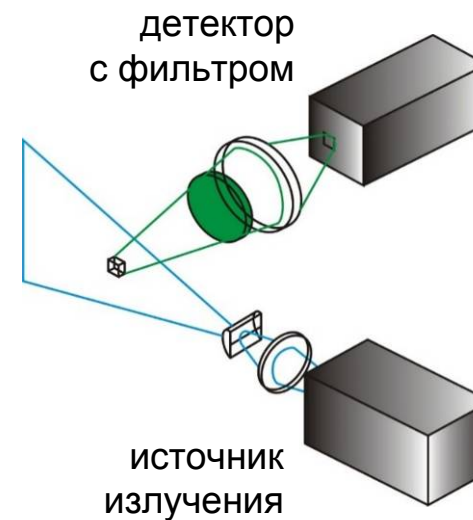


**Рассеяние Ми (PIV, интерферометрия):**  
 скорость и размер  
 полупрозрачных частиц

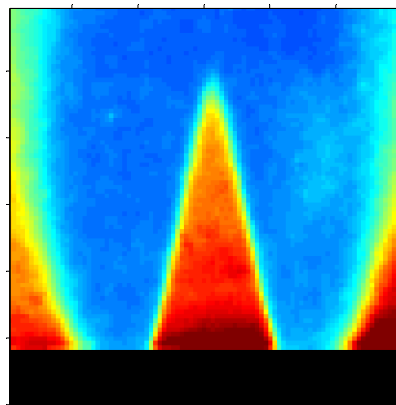
**Рассеяние Рэлея (РР):**  
 плотность

**Спонтанное комбинационное  
 рассеяние (СКР):**  
 плотность, температура,  
 концентрация (основных компонент)

**Флуоресценция (ЛИФ):**  
 концентрация малых добавок  
 (в области химического реагирования),  
 температура (и давление)

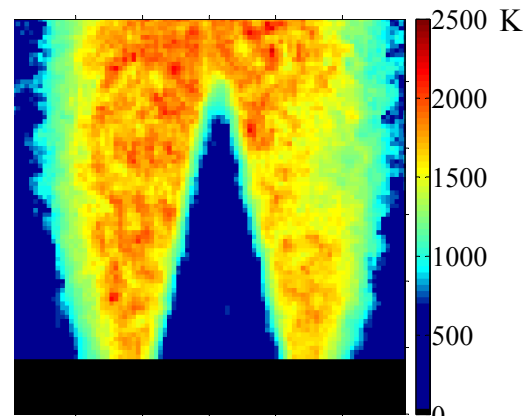


СКР, РР



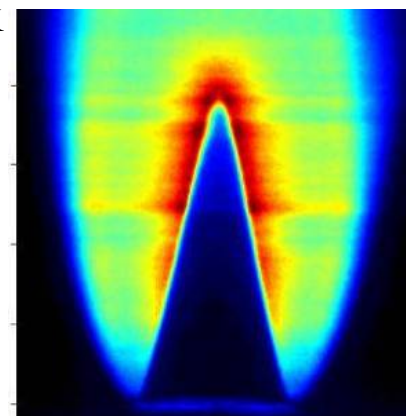
плотность

СКР

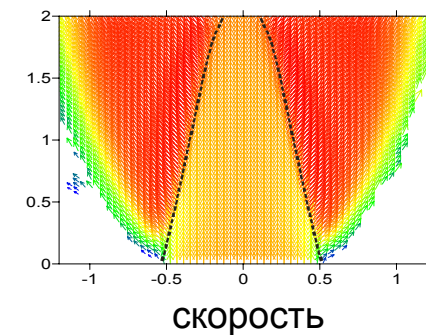


температура

ЛИФ (ОН)



концентрация (температура)



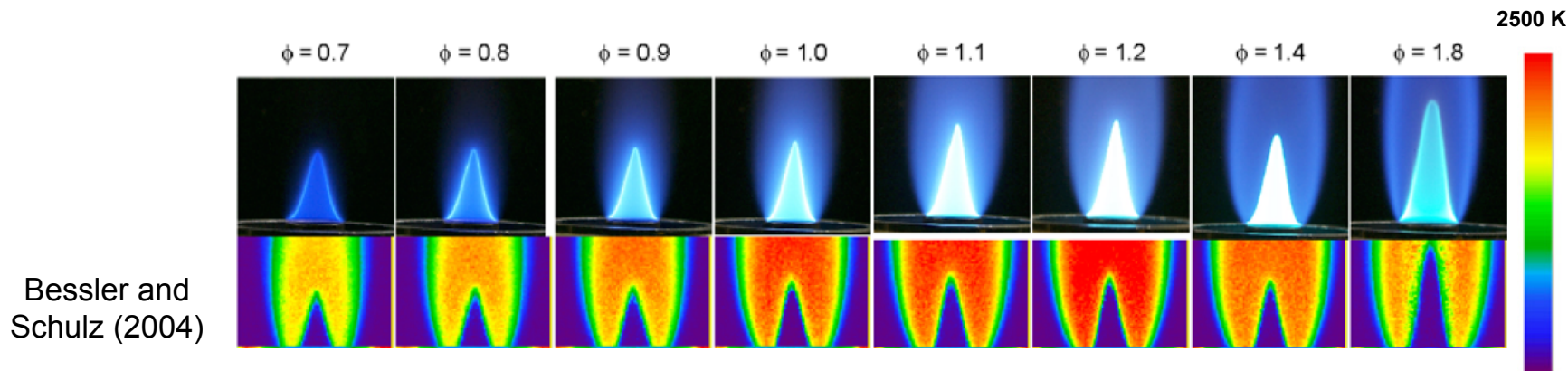


# Панорамная диагностика поля температуры

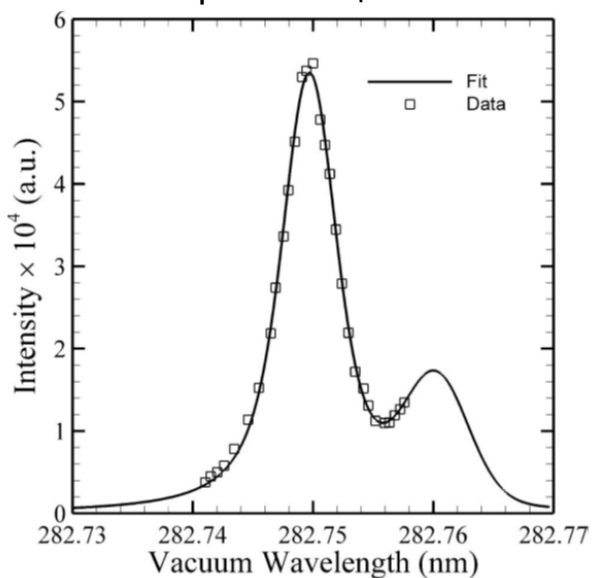


Плоскостная лазерно-индуцированная флуоресценция (ПЛИФ):

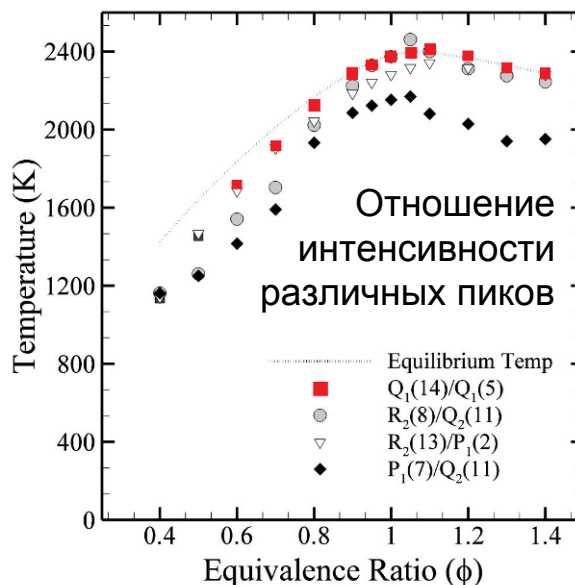
- изменение длины волны возбуждения переходов из уровней с различной населенностью;
- высокая интенсивность сигнала (по сравнению с СКР (Рамановским))



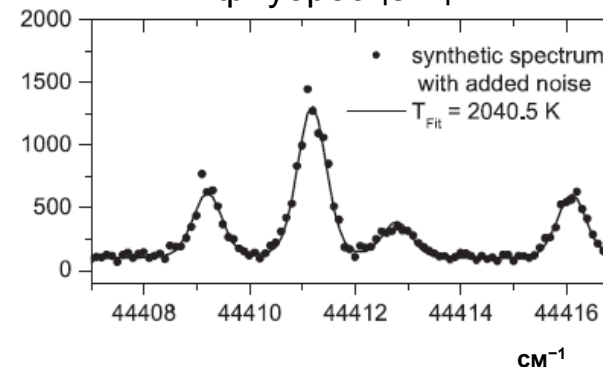
Аппроксимация пика



Kostka et al. (2009)



Аппроксимация спектра  
флуоресценции



W.G. Bessler, C. Schulz // Appl. Phys. B, 78(5) (2004) 519-533.

S. Kostka, S. Roy, P.J. Lakusta, et al. // Appl. Opt. 48(32) (2009) 6332-6343.

R. Devillers, G. Bruneaux, C. Schulz // Appl. Opt. 47(31) (2008) 5871-5885.

Численное моделирование спектров флуоресценции:

- учет релаксации в процессе столкновения (тушения флуоресценции)

Отработка методик измерения на ламинарного пламени:

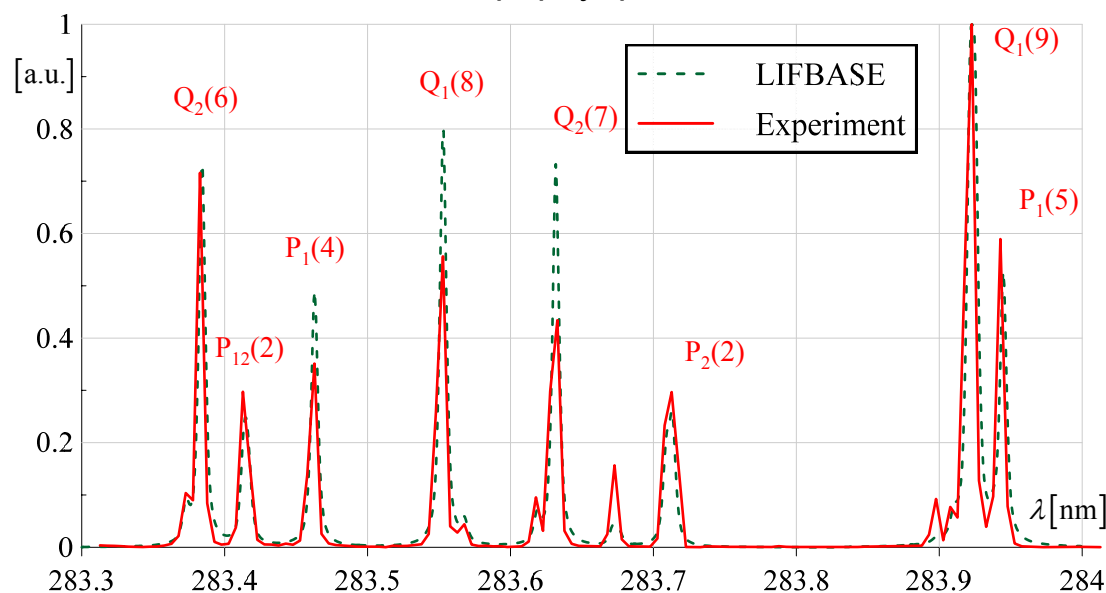
- использование лазера на красителе для возбуждения различных переходов;
- регистрация флуоресценции (СКР, РР) высокочувствительной камерой на основе электронно-оптического преобразователя и усилителя



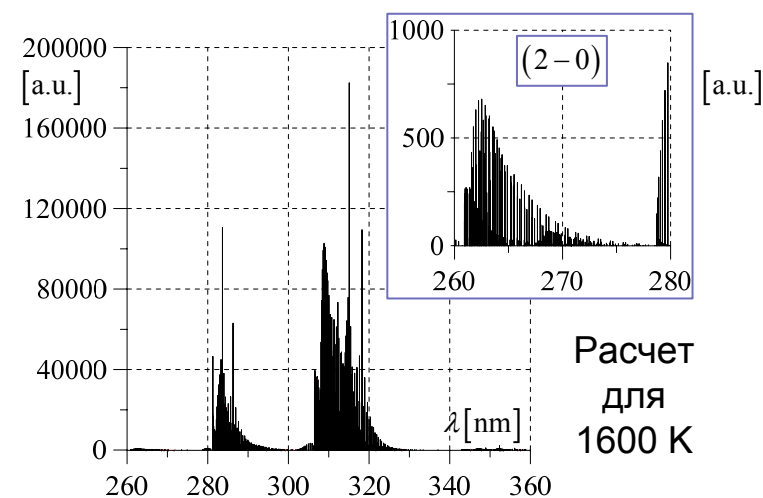
Применение в камере сгорания:

- турбулентное смесеобразование и горение за модельным (и реальными) фронтным устройством ГТУ

Спектр флуоресценции

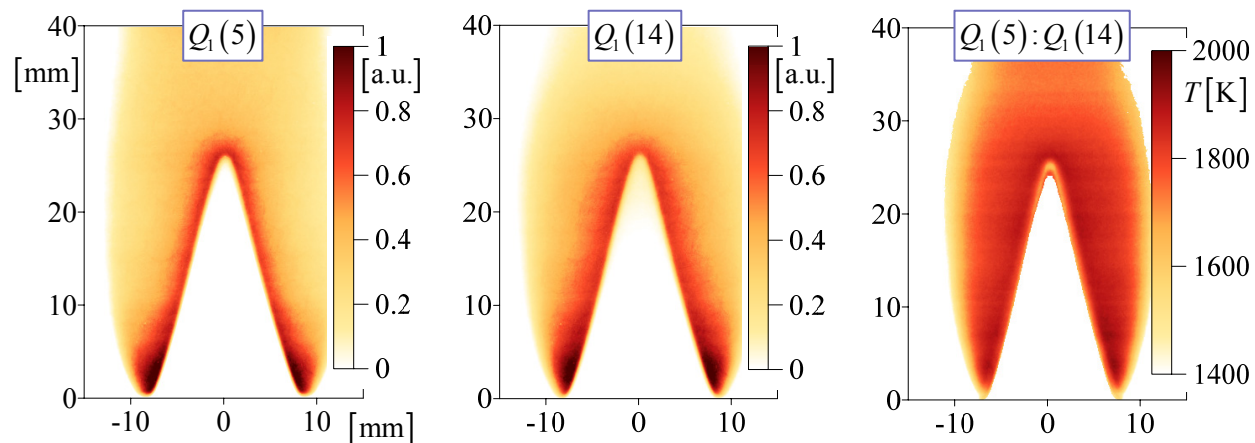


Возбуждение  $Q_1(8)$  линии перехода ( $1 \leftarrow 0$ ) системы  $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$  гидроксильного радикала (OH):

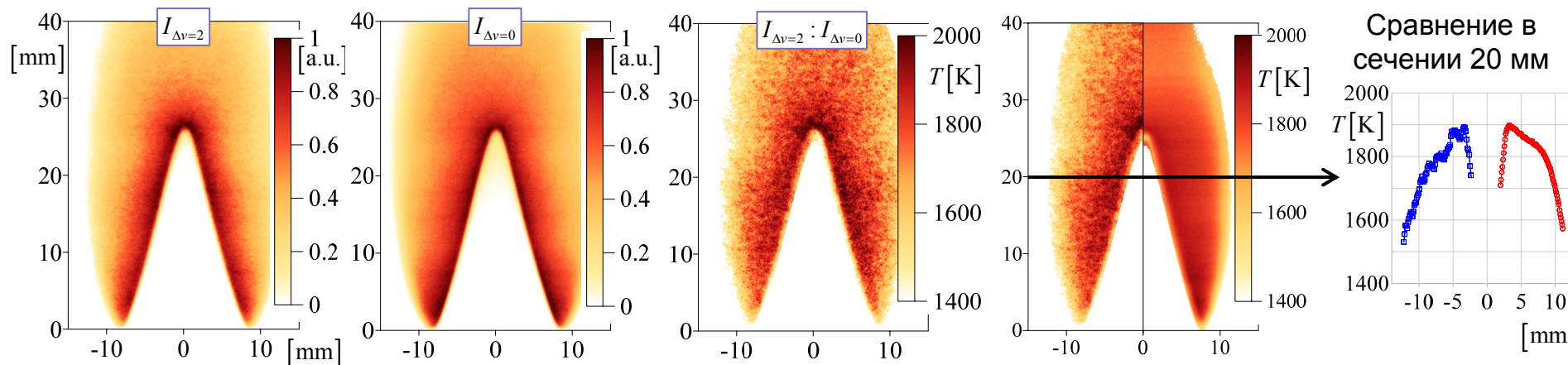




Возбуждение двух различных линий (1-0) и измерение переходов (1-1) и (0-0)



Предложена альтернатива (thermally assisted): возбуждение одной линии (1-0) и измерение относительной интенсивности различных переходов (2-0) и (0-0)+(1-1)



## Измерение поля температуры в моделях камер сгорания



Модель камеры сгорания ГТУ:

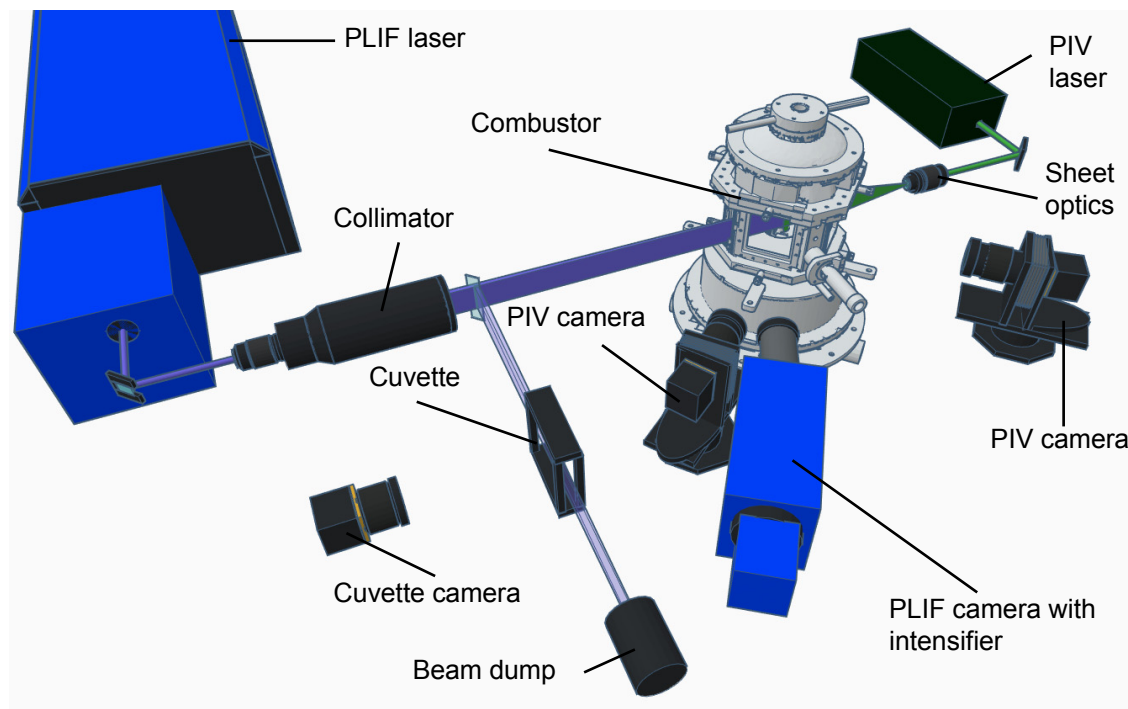
- модельное фронтное устройство;
- реальная геометрия фронтных устройств (ЦИАМ, Авиадвигатель, Силовые машины)

Повышенная температура и давление:

- до 8 атм и 500 К на входе в камеру

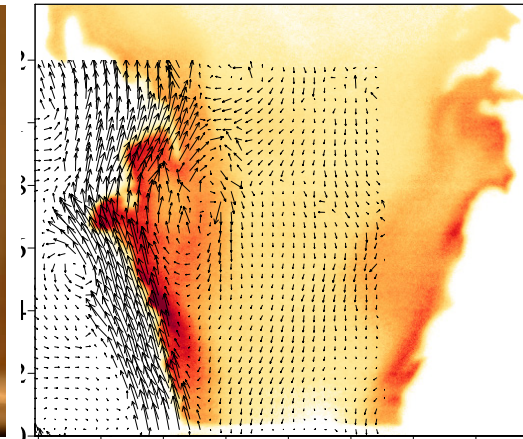
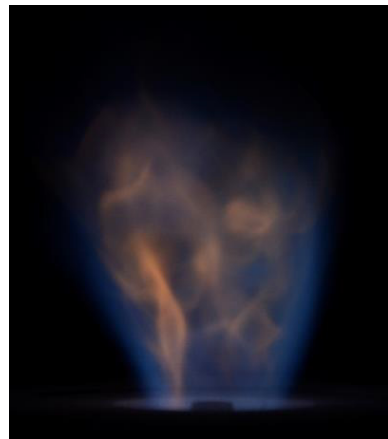
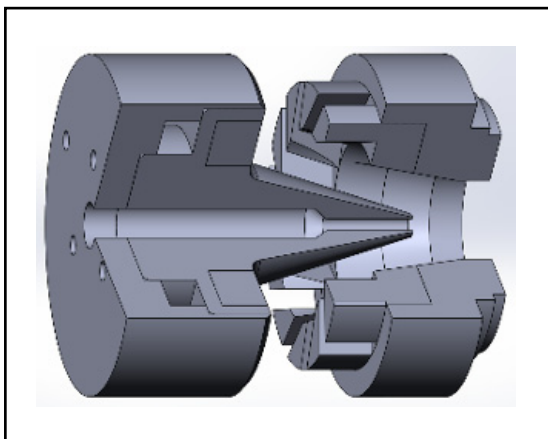
Оптическая диагностика:

- поле скорости;
- температура



1 атм, 293 К

2 атм, 500 К

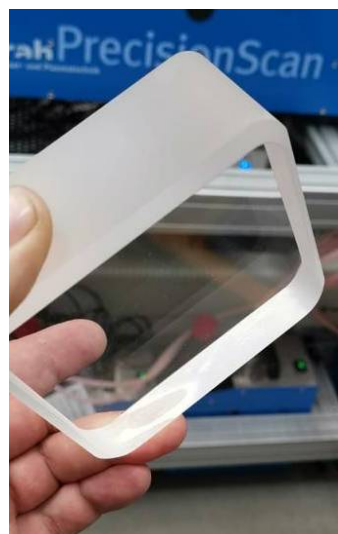
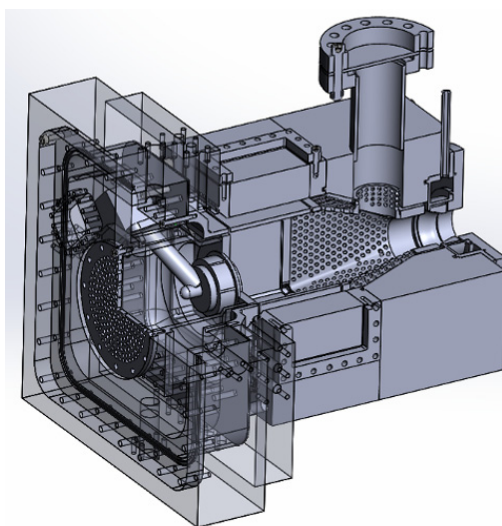


## Стенд для исследования горения керосина и метана

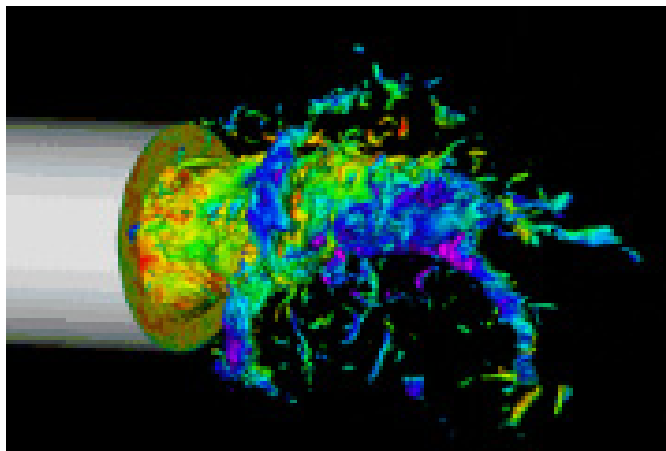


По заказу АО «ОДК-Авиадвигатель»:

- Стенд, обеспечивающий оптические измерения при 20 атм, 873 К;
- Перспективные фронтные устройства для ПД-14, ПД-35 (разработки Авиадвигатель, ЦИАМ);
- Распыл, смесеобразование и горение керосина (реалистичные расходы);
- Диагностика передовыми оптическими методами (2D, точечными)



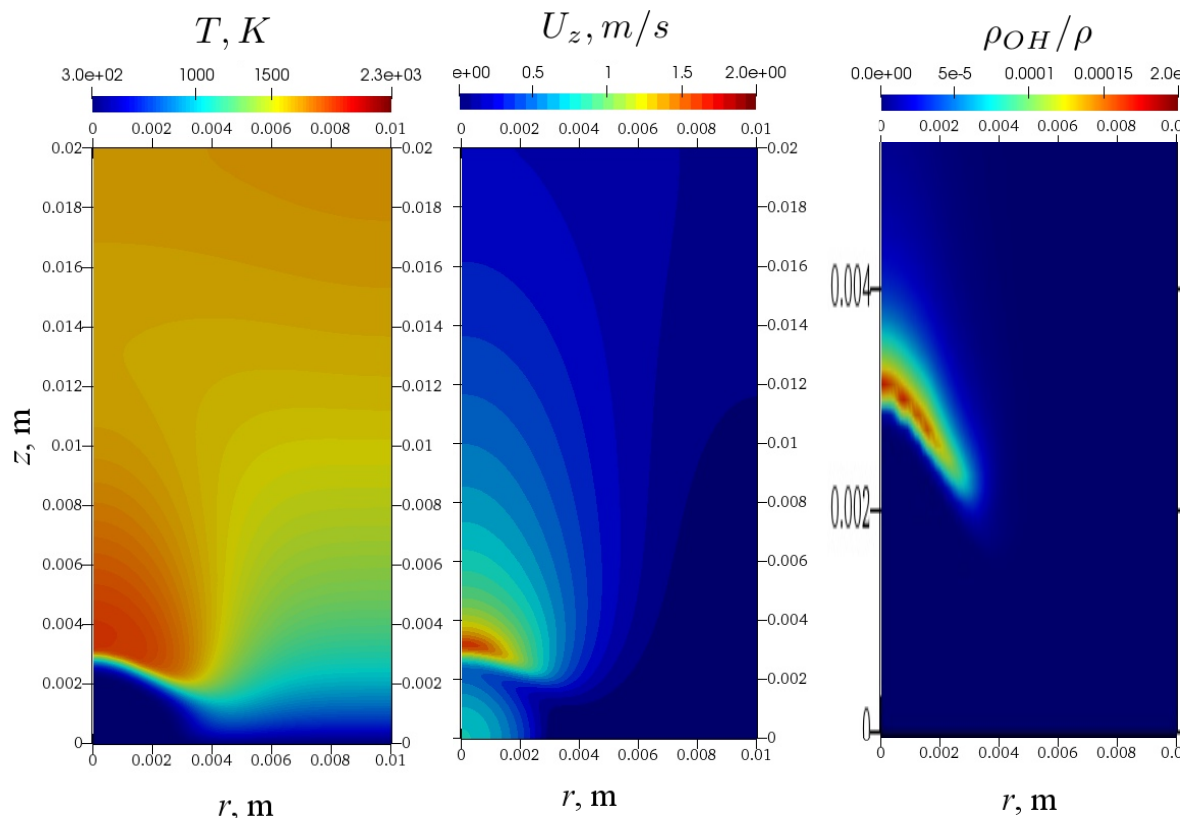




Детальный анализ динамики  
закрученных потоков,  
реализующихся в камерах сгорания.

Метод прямого численного  
моделирования уравнений  
Навье-Стокса (DNS) и метод  
крупных вихрей (LES).

Типичные вычислительные сетки  
~ 100 млн. узлов. Расчеты проведены  
на кластере ИТ СО РАН «Каскад».



Прямое численное моделирование аэродинамики и химических  
процессов горения в горелке Бунзена (метан + воздух).

Количество реагентов ~ 300, реакций ~ 2000.

Gelash A., Mullyadzhyanov R. // Physical Review E, 2020, 101 (5), 052206. **Q1 IF=2,296**

Hadžiabdić M., Palkin E., Mullyadzhyanov R., Hanjalić K. // Int.J.Heat & Fluid Flow, 2019, 79, 108441. **Q2 IF=2,073**

Palkin E., Hadžiabdić M., Mullyadzhyanov R., Hanjalić K. // J. Fluid Mechanics, 2018, 855, 236-266. **Q1 IF=3,333**

Mullyadzhyanov R.I., Sandberg R.D., Abdurakipov S.S., et al. // Phys.Rev.Fluids, 2018, 3 (6), 062601. **Q2 IF=2,512**



Основан в 1960 г.

# Объединенный институт высоких температур РАН

Основные научные направления:

- решение проблем создания эффективной, безопасной, надежной и экологически чистой современной энергетики, в том числе атомной, водородной, авиационной, космической и криогенной;
- исследования теплофизических, электрофизических, оптических и динамических свойств веществ и низкотемпературной плазмы в широком диапазоне параметров, включая экстремальные;
- исследования процессов тепло- и массообмена, физической газо- и плазмодинамики, преобразования видов энергии при переменных свойствах рабочих тел и высокой плотности энергетических потоков;
- исследования в области теплофизики интенсивных импульсных воздействий на вещество, материалы и конструкции; разработка методов и создание средств генерации высоких плотностей энергии;
- исследования в области энергоресурсосбережения и энергоэффективных технологий, химической энергетики, повышения эффективности использования природных топлив и сырья, использования возобновляемых источников энергии.

В ОИВТ РАН: 560 научных сотрудников, в том числе 6 академиков РАН и 3 чл.-корр. РАН, около 130 докторов и 230 кандидатов наук

Руководитель работ по КНП: Сон Э.Е., зав.отделом, академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ, лауреат Премии Правительства РФ (2010).

В составе коллектива исполнителей КНП: 4 доктора и 14 кандидатов наук, 5 аспирантов.

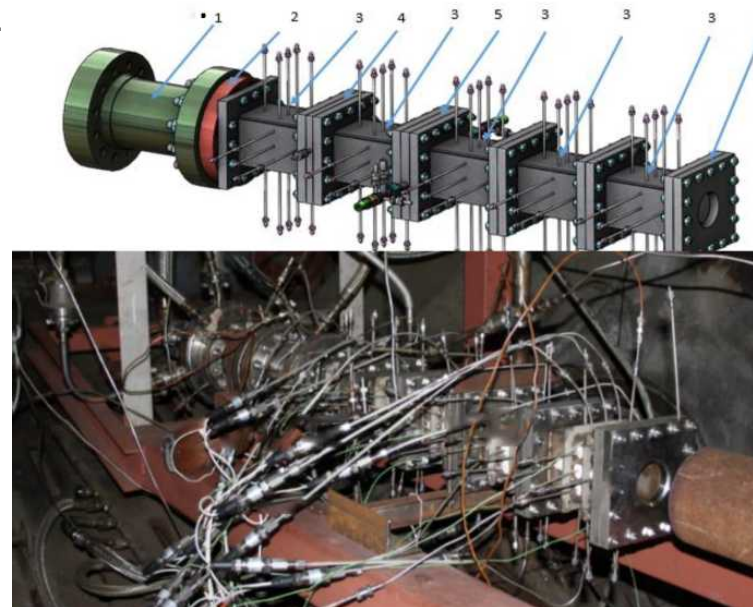
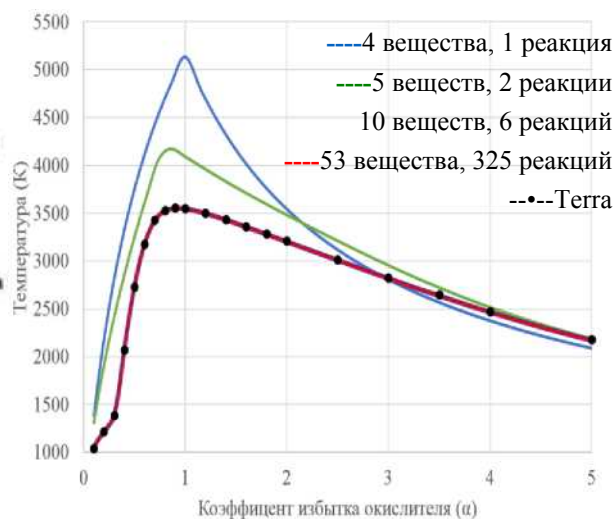
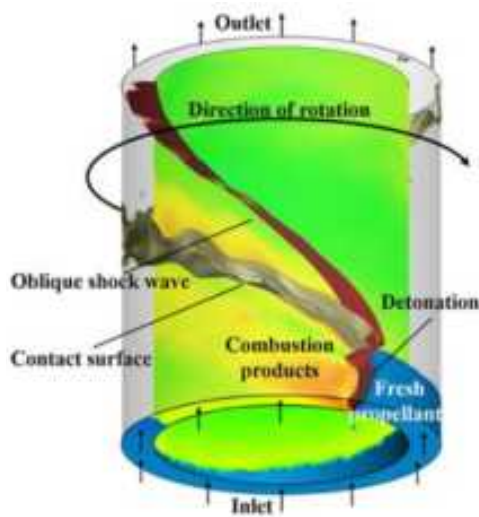


# Направление 1. Разработка фундаментальных основ управления процессами горения ряда перспективных топлив, включая проблемы стабилизации и интенсификации горения в энергосиловых установках

Проанализированы возможные методы управления горением: создание обратных токов, стабилизация за плохо обтекаемыми телами, электроразрядная стабилизация, детонация.

Проанализированы существующие и разработаны адаптированные подходы для моделирования макрокинетических механизмов при горении водорода и углеводородов в различных условиях. Предложены новые методики обработки экспериментальных данных и нормирования результатов оригинальных и проведенных другими авторами экспериментов.

Создана экспериментальная установка для исследования методов стабилизации и интенсификации горения водорода, метана, пропана, этилена и др. углеводородов в воздушном потоке при температурах на входе до 2300 К с возможностью использования электрического, плазменного и огневого подогрева.

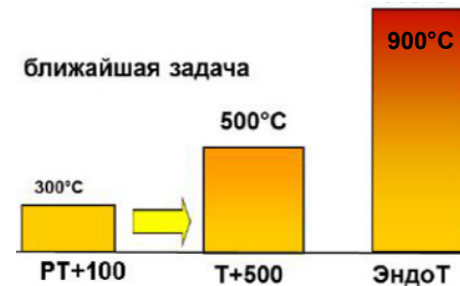
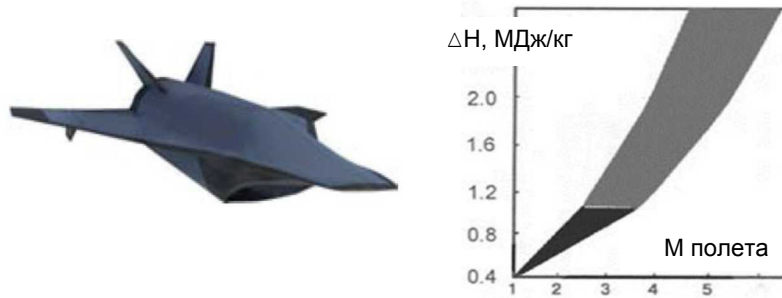




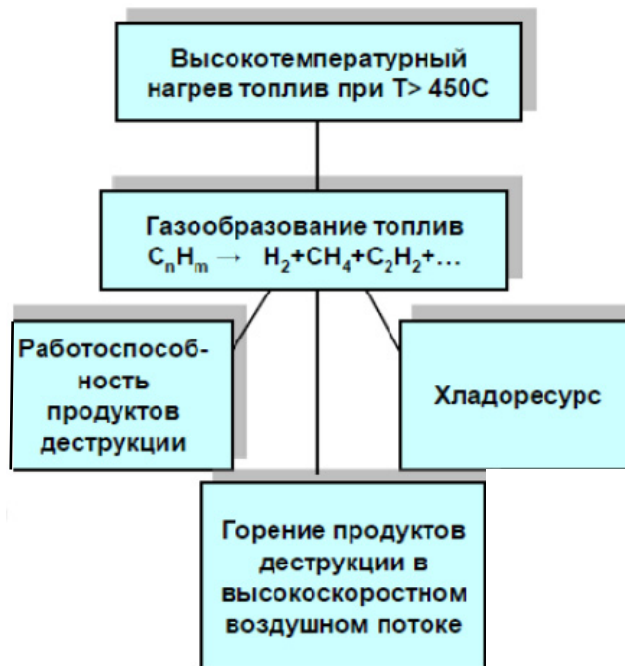


## Направление 2. Эндотермические синтетические топлива – энергоносители нового поколения

Жидкие топлива для сверхзвуковых и гиперзвуковых ЛА с ВРД.  
Функции топлива: охладитель, рабочее тело, горючее.



Проблема: создание эндотоплива оптимального состава



Эндотермический тепловой эффект реакций:

- термический и каталитический пиролиз,  $Q_{\max} = 1-2$  МДж/кг;
- дегидрирование,  $Q_{\max} = 2-3$  МДж/кг;
- пароводяная и углекислотная конверсия,  $Q_{\max} = 4-6$  МДж/кг.

Яновский Л.С., Шигабиев Т.Н., Галимов Ф.М. Эндотермические топлива и рабочие тела силовых и энергетических установок. – Казань. Изд-во КИЦ РАН, 2016. – 264 с.



Ударная труба (ИПХФ РАН)  
Длина КВД = 1,5 м, КНД = 4,5 м,  
 $P_{\max}$  в КВД = 250 атм, в КНД = 100 атм,  
температура в КНД  
за фронтом волны: 700-10000 К



## Направление 3. Кинетические механизмы образования окиси углерода при окислении биоспиртов и эфиров

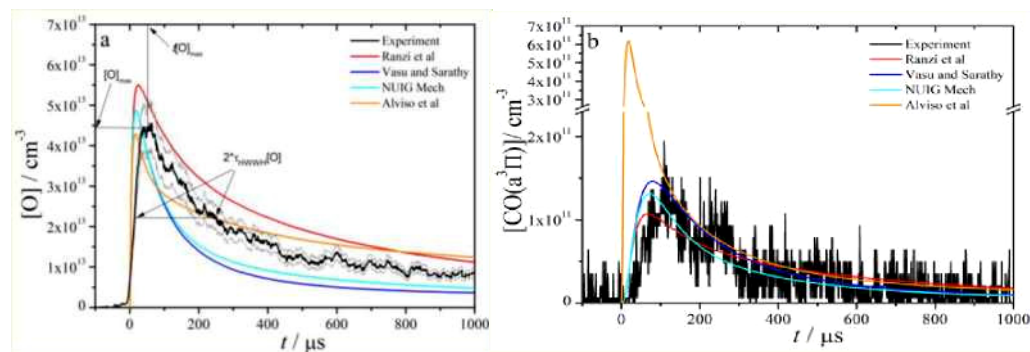
### Стенд «НЕФРИТ» («Неравновесные Функции Распределения в Импульсных Течениях»)

Высоковакуумная кинетическая ударная труба, оборудованная современным диагностическим комплексом атомно-резонансной абсорбционной спектроскопии (АРАС), позволяющим с высокой чувствительностью и точностью получать количественные данные о временных профилях атомных концентраций в высокотемпературных реакциях за ударными волнами. Данные используются для прямого определения констант скоростей химических реакций, позволяя изучать кинетику элементарных химических реакций в широком диапазоне температуры и давления.

Впервые в России реализована прецизионная методика атомно-резонансной абсорбционной спектроскопии (АРАС) в ВУФ области спектра за ударными волнами. Прямыми измерениями получены константы скоростей реакций пиролиза и окисления перспективных биотоплив

Экспериментально изучена кинетика образования монооксида углерода при высокотемпературном окислении диметилэфира  $\text{CH}_3\text{OCH}_3$ , бутанола  $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$  и метана в широком диапазоне температур. Во всех исследованных смесях впервые зафиксировано неравновесное излучение триплета  $\text{CO}(a^3\Pi_r)$ . Разработан и внедрен в современные кинетические модели механизм его формирования и расходования, позволяющий удовлетворительно описать все полученные данные. Предложена новая эмиссионная диагностика CO, пригодная для изучения процессов горения большого класса углеводородных соединений.

Экспериментальные и расчетные профили  $[\text{O}]$  и  $[\text{CO}(a^3\Pi_r)]$  при окислении диметилэфира  $\text{CH}_3\text{OCH}_3$



N. Bystrov, A. Emelianov, A. Eremin, B. Loukhovitski, A. Sharipov, P. Yatsenko // *Combustion & Flame*, 2020, Vol. 218, P. 121-133. **Q1**  
G. Capriolo, N. Bystrov, A. Emelianov, A. Eremin, P. Yatsenko, A. Konnov High-temperature oxidation of propanol isomers in the mixtures with  $\text{N}_2\text{O}$  at high Ar dilution conditions // *FUEL*, 2020, Vol. 287. **Q1**



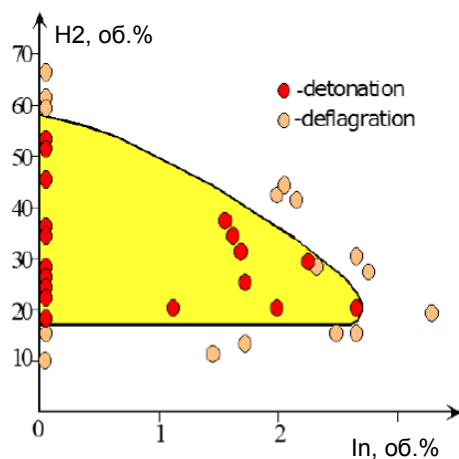
## Направление 4. Научные основы управления горением, взрывом и детонацией методами ингибирования

Показано, что вопреки общепринятым представлениям, горение газов протекает по цепному механизму не только при низком давлении и различных тепловых режимах.

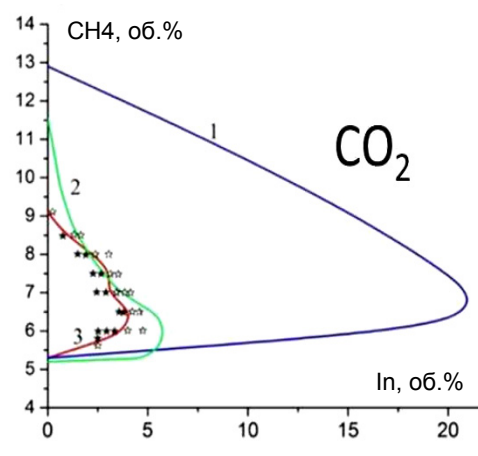
Выявлены кинетические механизмы горения, взрыва и детонации газов, определяющие расход реагентов в этих процессах за  $10^{-5}$  -  $10^{-6}$  с. На этой базе получили объяснение основные закономерности, не имеющие объяснения ранее.

Разработаны эффективные химические методы управления горением, взрывом и детонацией, испытанные на примерах водорода, метана, синтез газа (предотвращение возгорания, гашения, взрыва и детонации с использованием экологически безопасных ингибиторов. Разработаны и испытаны при межведомственных комиссиях химические методы управления переходом горения водорода в детонацию в действующей модели ПВД, а также горения и взрыва метана в шахтах. Испытания успешно проведены также совместно с Институтом им. М. Планка и Институтом физической химии в Геттингене.

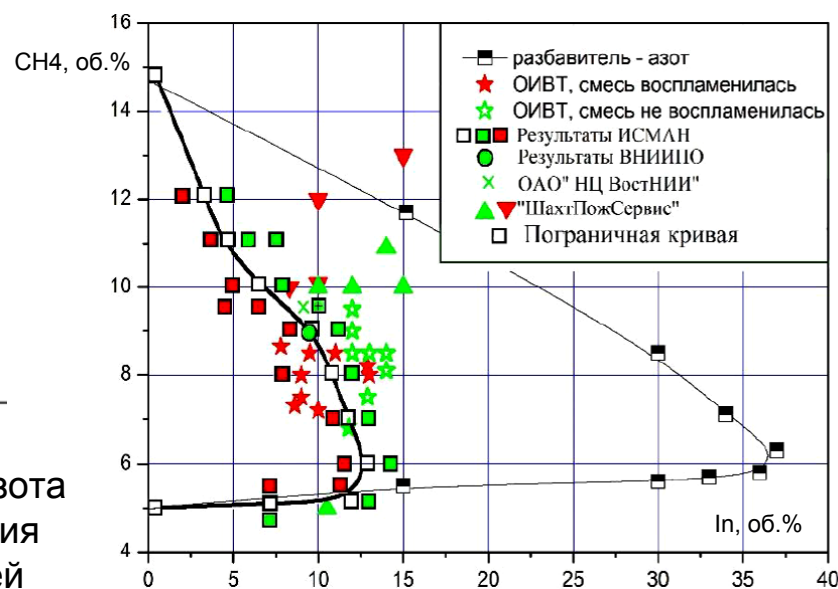
Результаты явились базой для разработки цепной теории горения, взрыва и детонации газов.



Ингибирование перехода горения в детонацию в смесях  $H_2 + O_2$

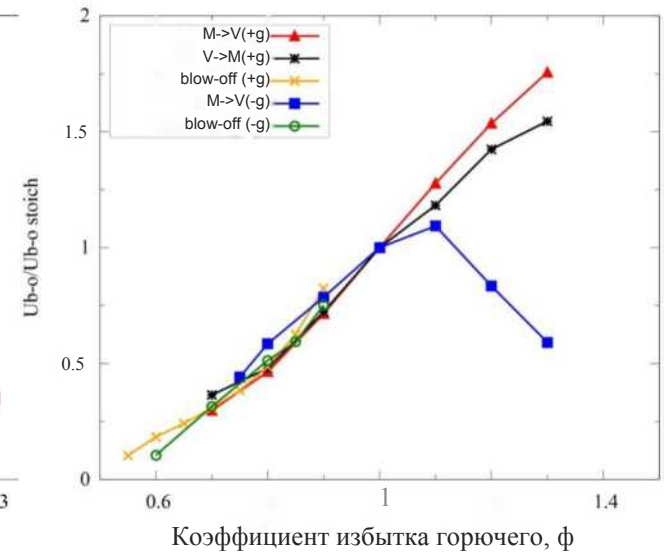
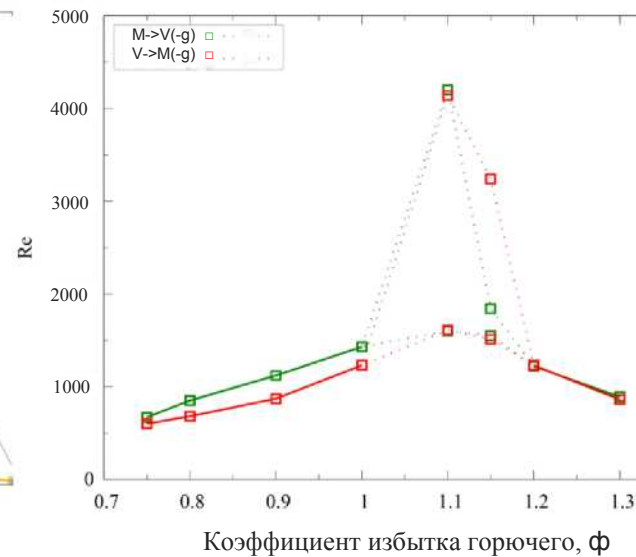
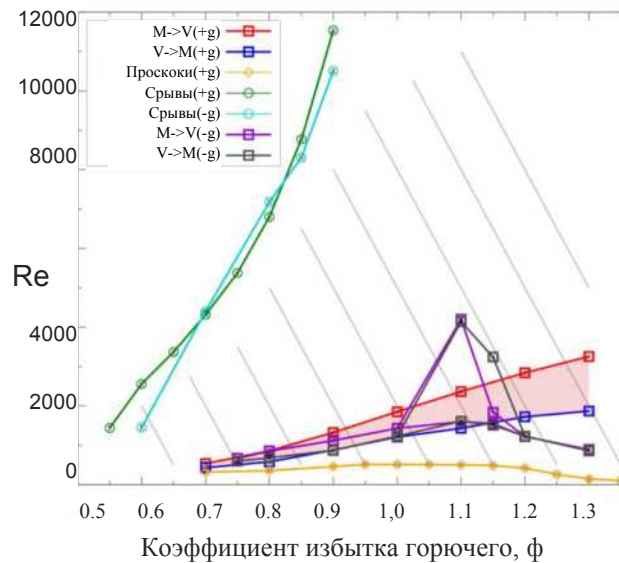
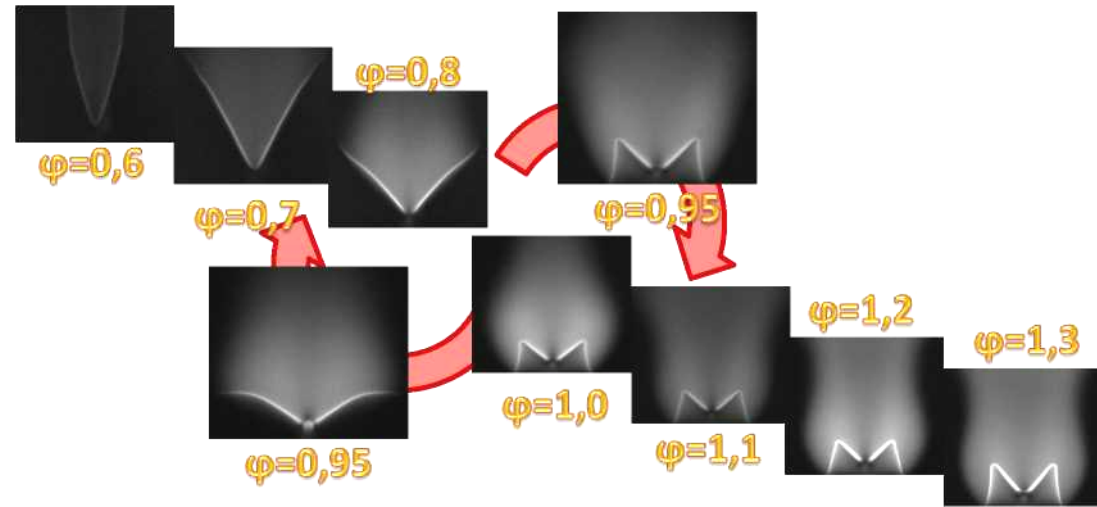


Влияние трифторметана азота на пределы воспламенения метановоздушных смесей





# Направление 5. Фундаментальные проблемы горения в условиях микрогравитации и акустического воздействия на пламена

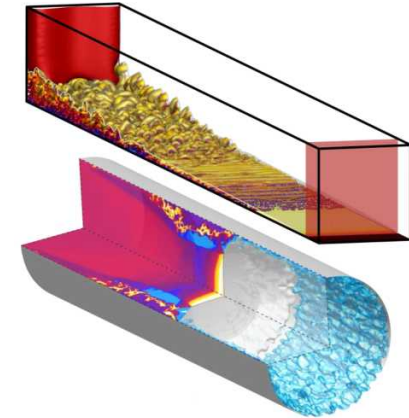




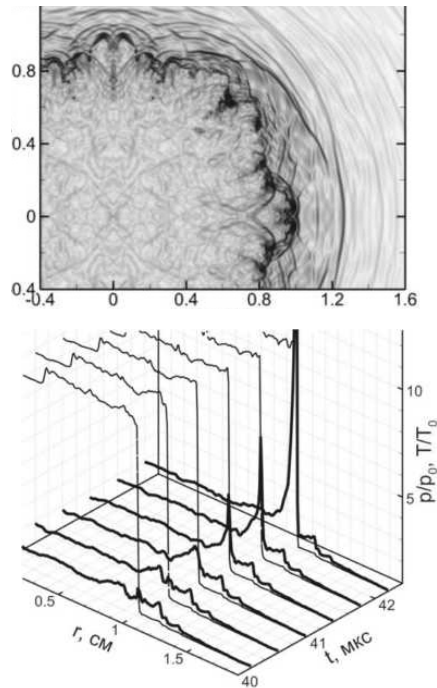


## Направление 6. Теоретическое исследование закономерностей при нестационарных режимах распространения пламени

На основе современных подходов к разработке программного обеспечения создан уникальный эффективный комплекс вычислительной газовой динамики, ориентированный на использование высокопроизводительных суперкомпьютеров для решения многомерных нестационарных задач горения и взрыва в газообразных и дисперсных средах.

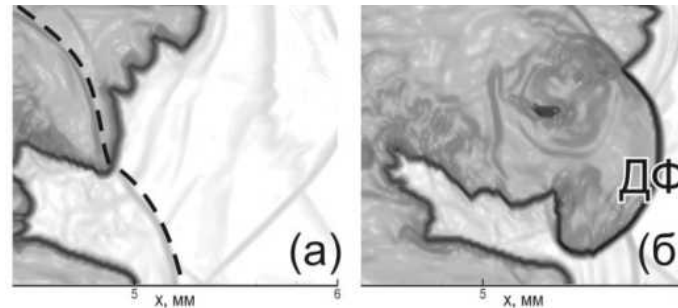


### Структура расходящегося пламени и роль формируемых акустических полей в динамике горения

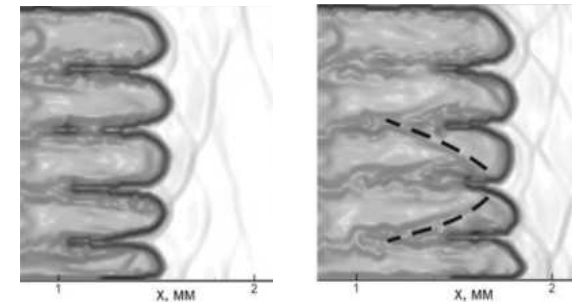


Давление и температура в окрестности ведущей точки фронта пламени

В рамках численного моделирования впервые продемонстрированы ведущие механизмы возникновения и усиления волн сжатия при свободном распространении волны дефлаграционного горения в газообразных и дисперсных смесях в открытом пространстве. [Kiverin A.D., Yakovenko I.S. // Acta astronautica, 2021 (in press), Q1, IF=2.83]



Переход горения в детонацию: картина течения в последовательные моменты времени через 5 мкс (штриховая линия – фронт ударной волны, ДФ - детонационный фронт)



Картина течения в области фронта пламени на стадии нелинейной стабилизации неустойчивости и образования ударной волны (штриховая линия)



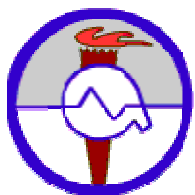
## КНП-2020:

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. Определены элементарные реакции, уточнены константы скоростей реакций. Разработанные механизмы удовлетворительно описывают все экспериментальные зависимости.

На основе численного моделирования описана структура расходящегося пламени и определена роль формируемых акустических полей в динамике горения газообразных и дисперсных смесей. 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.

На примере обратного конического метано-воздушного пламени экспериментально получены интегральные характеристики горения в условиях нормальной и реверсной гравитации. 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.

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).



# Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН



(1957 г.)

Основные научные направления:

кинетика элементарных процессов и механизмов химических превращений;  
структура и динамика химических и биологических систем на молекулярном,  
супрамолекулярном и микроскопическом уровнях;

**механизмы горения в газовой и конденсированной фазах;**  
экологическая химия.

штат: **283, 115** научных сотрудников, **30** докторов и **67** кандидатов наук



**Задача в рамках КНП: Комплексное теоретическое и экспериментальное  
изучение химии и кинетики процессов горения тяжелых углеводородных  
топлив, а также эффективных сажеподавляющих присадок к ним**

В составе исполнителей проекта: 1 доктор и 4 кандидата наук, 1 аспирант

Knyazkov D.A., Dmitriev A.M., Bolshova T.A. et al. // *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36.

DOI: 10.1016/j.proci.2016.07.109 **Q1 IF= 5,627**

Knyazkov D.A., Dmitriev A.M., Shvartsberg V.M. et al. // *Energy & Fuels*, 2017, 31.

DOI: 10.1021/acs.energyfuels.7b01597 **Q1 IF=3,277**

Osipova K.N., Sarathy S.M., Korobeinichev O.P., Shmakov A.G. // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2020.

DOI: 10.1016/j.proci.2020.06.033 **Q1 IF=5,627**

Gerasimov I.E., Knyazkov D.A., Bolshova T.A. et al. // *Combustion and Flame*, 2020, 222.

DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.08.028 **Q1 IF=4,57**

Osipova K.N., Bolshova T.A., Korobeinichev O.P. et al. // *Energy & Fuels*, 2019, 33.

DOI: 10.1021/acs.energyfuels.9b00166 **Q1 IF=3,277**

Knyazkov D.A., Bolshova T.A., Dmitriev A.M. et al. // *Energy & Fuels*, 2018, 32. DOI:10.1021/acs.energyfuels.7b03185 **Q1 IF=3.277.**

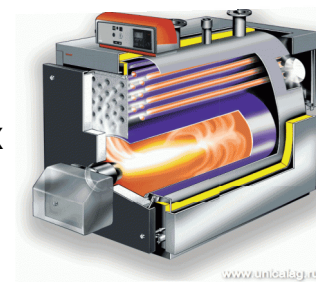
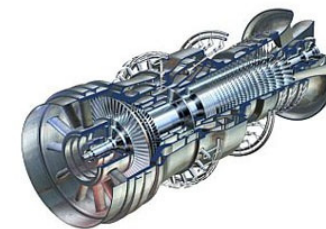
Knyazkov D.A., Gerasimov I.E., Hansen N., et al. // *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36.

DOI: 10.1016/j.proci.2016.07.038 **Q1 IF=5,627**

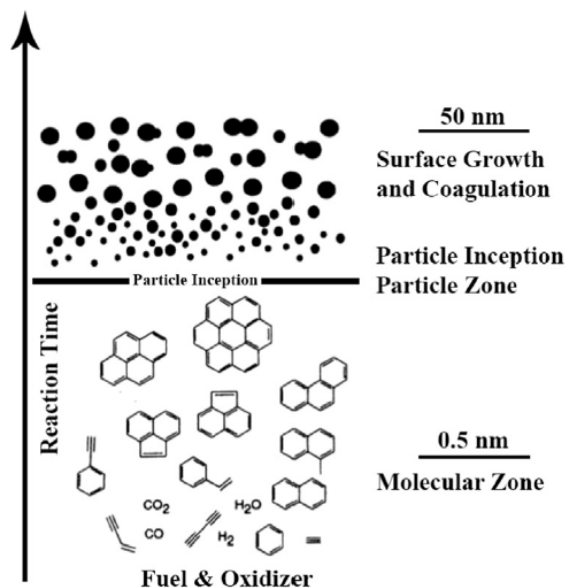


# Химия и кинетика горения углеводородных топлив

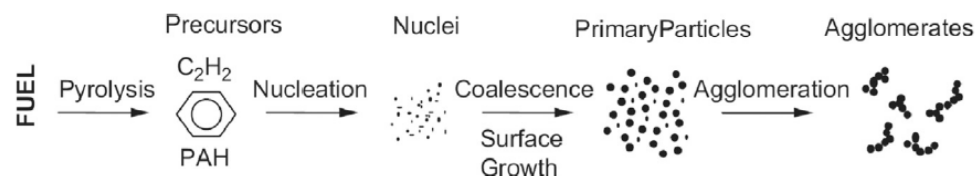
- Организация процессов в камерах сгорания – основа для совершенствования двигателей внутреннего сгорания и газовых турбин
- Детальные химико-кинетические механизмы горения углеводородов – основа для определения условий экологически чистого и эффективного сгорания
- Экспериментальное исследование структуры пламени (содержания различных веществ) при различных условиях – ключевой этап обоснования химико-кинетических механизмов горения этих видов топлива



## Образование сажи



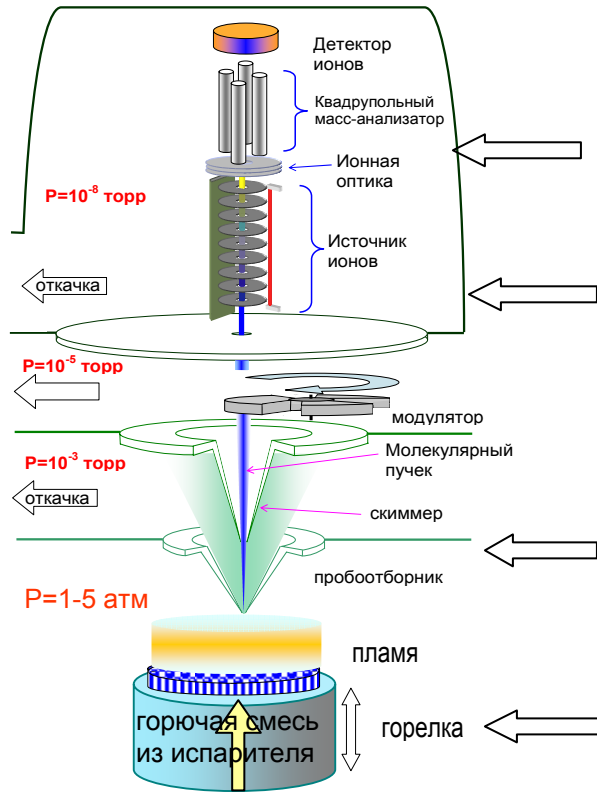
- При горении углеводородов образуются различные промежуточные соединения, часть из которых является прекурсорами полициклических ароматических углеводородов (ПАУ).
- ПАУ образуются в пламенах в основном за счет реакций молекул легких углеводородов (ацетилена) с другими углеводородами.
- Первичные сажистые частицы образуются в результате поверхностного роста или коагуляции этих более крупных ароматических соединений.







# Зондовая молекулярно-пучковая масс-спектрометрия с мягкой ионизацией электронным ударом (уникальная установка)

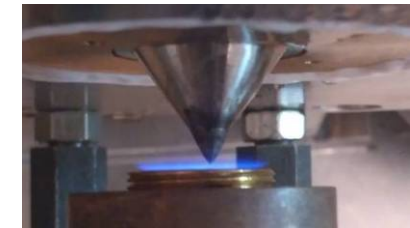
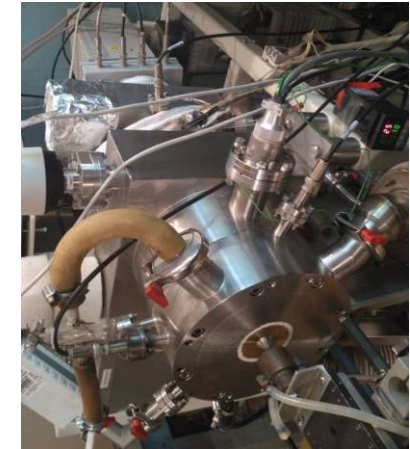
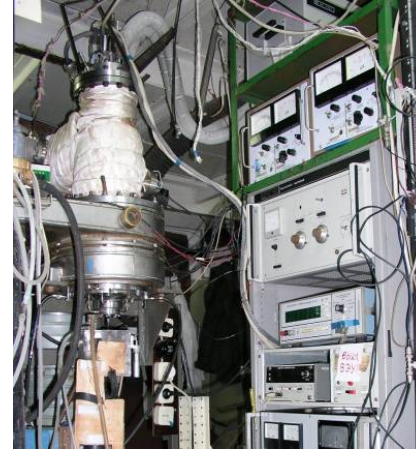


Возможность детектирования соединений и **радикалов** концентрацией не менее  $10^{-5}$  мольных долей

Энергия ионизирующих электронов от **8 до 21 эВ** ( $\pm 0,25$  эВ)

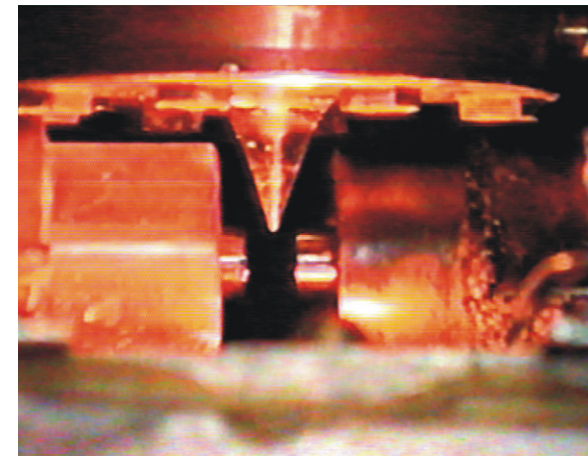
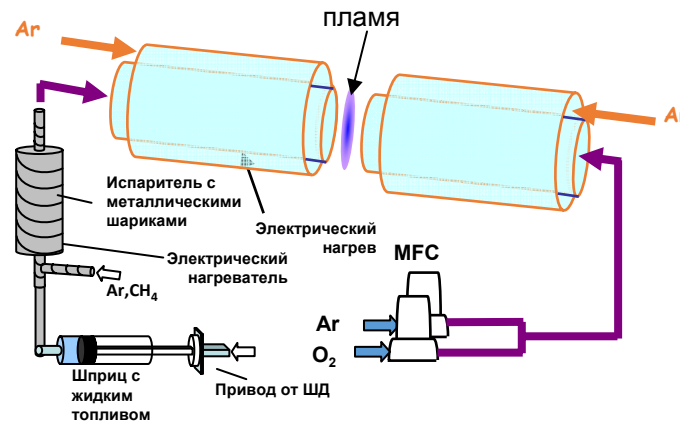
Диаметр отверстия **80 мкм**  
 Толщина стенок вблизи вершины  $\sim 80$  мкм  
 Внутренний угол  $40^\circ$

Диаметр горелки **1,6 см**  
 $T = 95-185^\circ\text{C}$



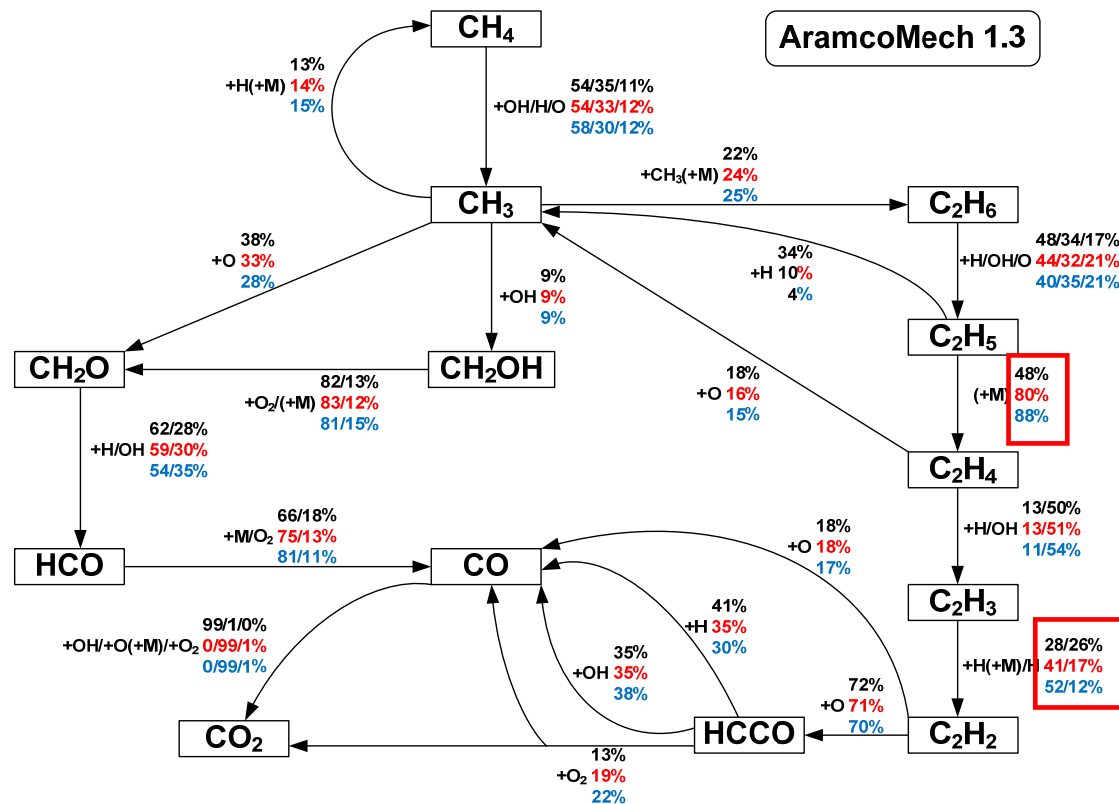
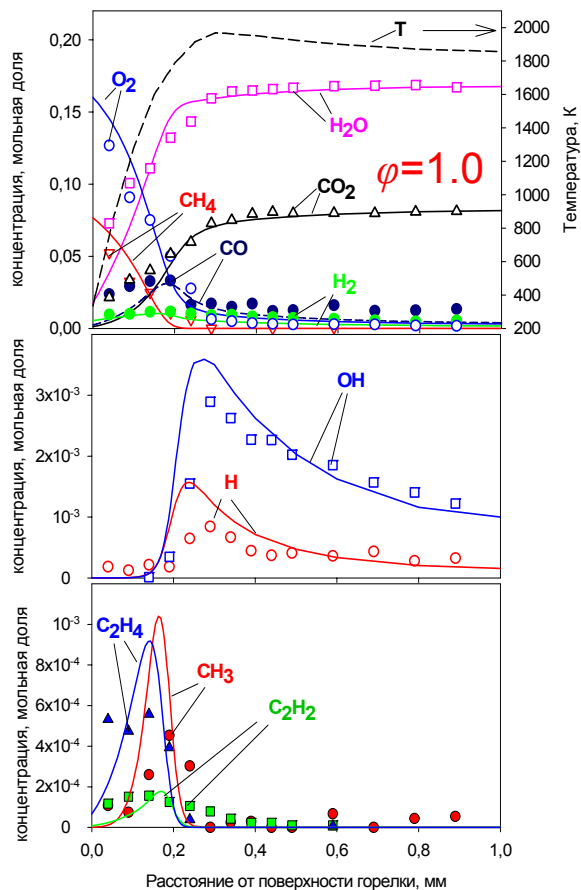
Горелка для пламен предварительно перемешанных смесей

Горелка для диффузионных пламен





# Влияние давления на механизм окисления метана

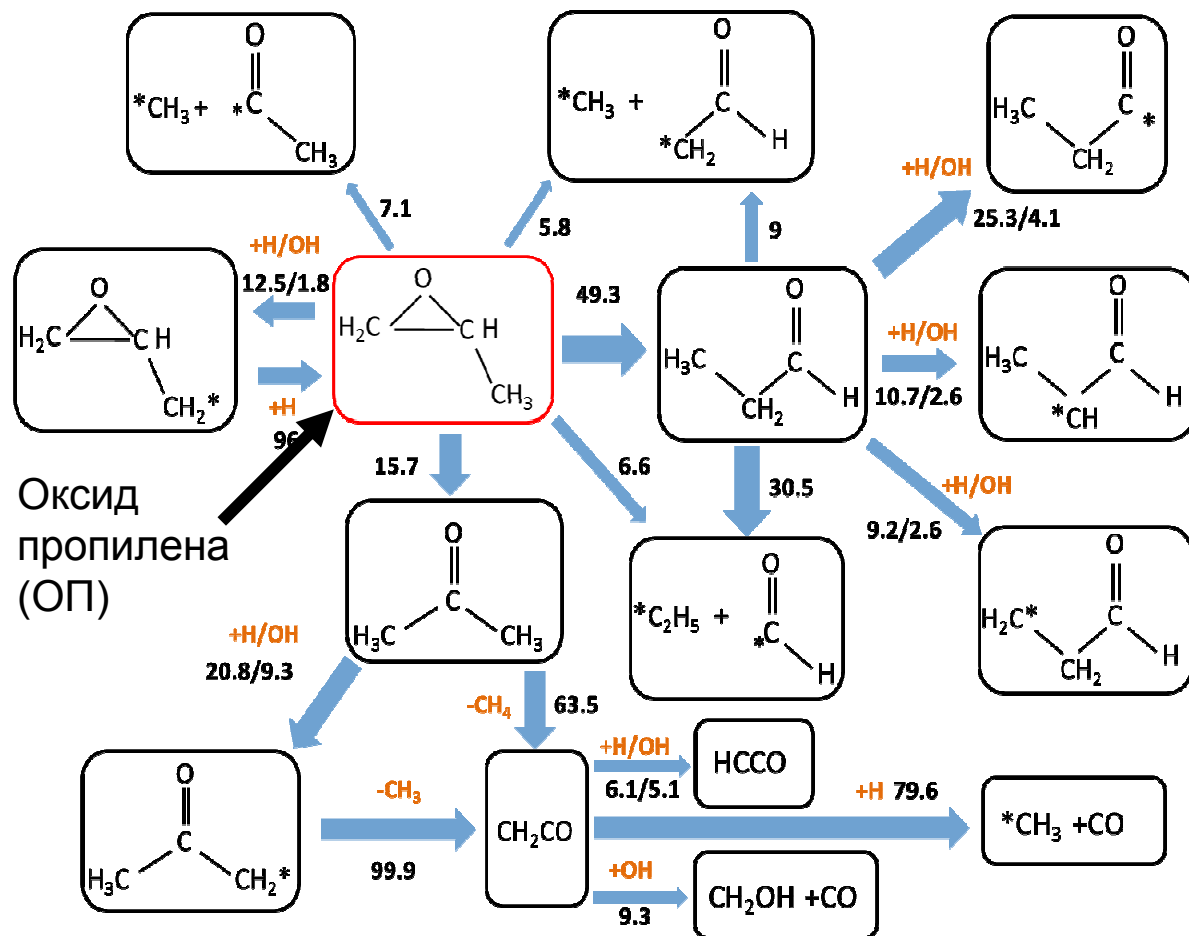


Профили температуры и концентраций стабильных соединений –  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  (вверху), атомов и радикалов  $\text{H}$  и  $\text{OH}$  (в середине), а также  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$  и радикалов  $\text{CH}_3$  (внизу), в пламени  $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$  при 5 атм с  $\phi=1.0$ . Линии – численное моделирование, символы – эксперимент.

Главные пути реакций окисления метана в стехиометрическом  $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$  пламени (ответственных за рост концентрации прекурсоров сажеобразования при повышении давления в метановых пламенах). Верхние значения (чёрный): 1 атм, значения в середине (красный): 3 атм, нижние значения (синий): 5 атм.



## Механизм превращения модельных кислородсодержащих топливных присадок



Оксид пропилена (ОП)

### КНП-2020:

Оксид пропилена (ОП) рассматривается как перспективная присадка к дизельным топливам, снижающая содержание сажи и ПАУ в выхлопных газах.

Установлены основные пути превращения ОП в пламенах модельных дизельных топлив. Показано, что добавка 2% ОП приводит к снижению на 30% максимальных концентраций предшественников сажи и ПАУ.

Основные пути превращения оксида пропилена (ОП) в пламени смеси ОП/O<sub>2</sub>/Ar, p=1 atm, (φ=1.3). Толщина стрелок пропорциональна вкладу указанных путей в скорость превращения соединений. Цифры у стрелок указывают количественный вклад данного пути.

Knyazkov D.A., Dmitriev A.M., Korobeinichev O.P. // Proceedings of the Combustion Institute. 2020. DOI: 10.1016/j.proci.2020.06.336 Q1 IF=5.627

# Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН



Основан в 1957 году  
в числе первых Институты СО АН СССР

Задача в рамках КНП:  
Изучение механизмов диффузионного горения  
микроструй водорода при истечении  
с дозвуковой или сверхзвуковой скоростью  
в различных условиях

В составе исполнителей КНП:  
1 доктор и 3 кандидата наук, 4 аспиранта

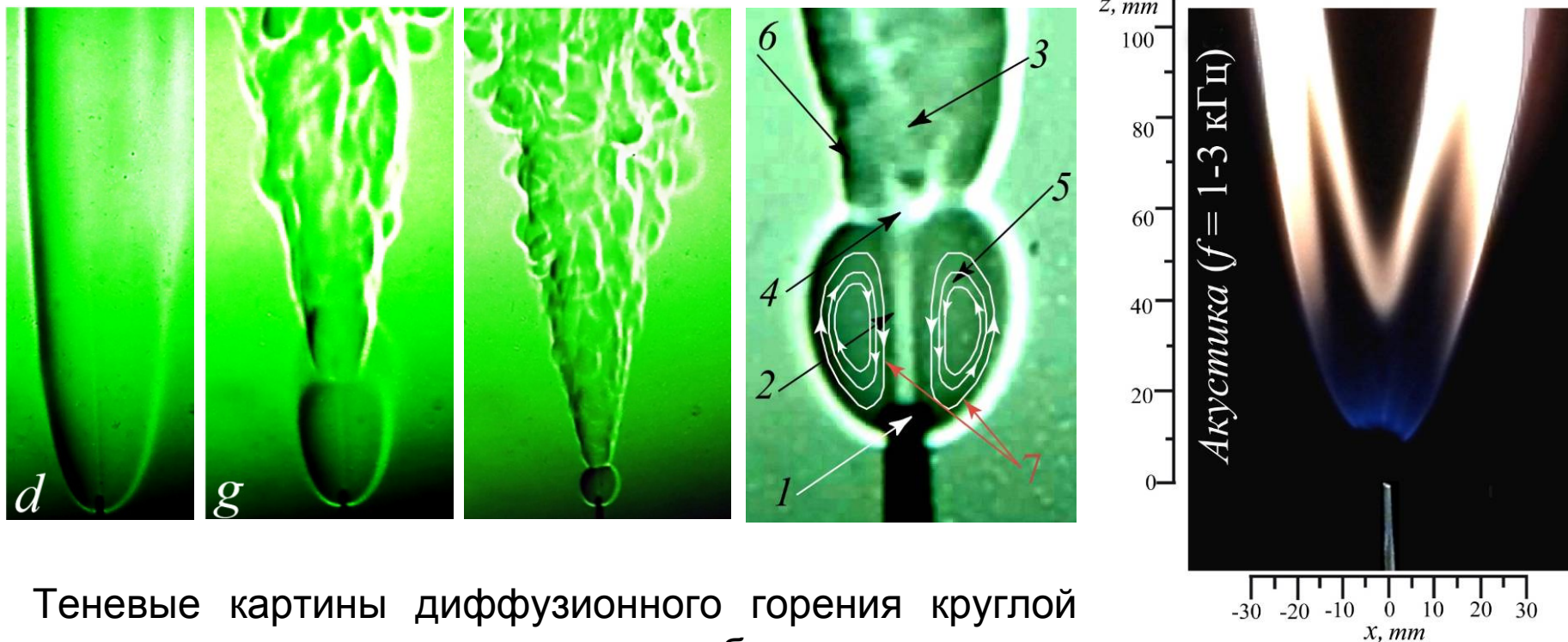


Litvinenko Y.A., Grek G.R., Kozlov V.V., Litvinenko M.V., Shmakov A.G. // Doklady Physics. – 2020. – Vol. 65, No. 9. – P. 312-316. DOI: 10.1134/S1028335820090074 Q4 IF=0,65  
Kozlov V.V., Grek G.R., Kozlov G.V., Litvinenko Y.A., Shmakov A.G. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – Vol. 44, No. 1. – P. 457-468. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.03.002 Q2 IF=4.939  
Shmakov A.G., Grek G.R., Kozlov V.V., Litvinenko Y.A. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42, No. 24. – P. 15913-15924. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.05.091 Q2 IF=4.939





## СТРУКТУРА ПОТКА ПРИ ГОРЕНИИ МИКРОСТРУЙ РАЗНОГО СОСТАВА, ИСТЕКАЮЩИХ ИЗ ЩЕЛЕВЫХ, ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И КОАКСИАЛЬНЫХ КАНАЛОВ С ДОЗВУКОВОЙ И СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ



Теневые картины диффузионного горения круглой струи водорода в зависимости от объемного расхода водорода 10-70 см<sup>3</sup>/с, диаметр сопла 0,25 мм.

1 – сопло, 2 – ламинарная струя, 3 – турбулентная струя, 4 – перепад плотности среды, 5 – «область перетяжки пламени», 6 – турбулентное пламя, 7 – тороидальный вихрь

Бифуркация пламени при горении плоской микроструи пропана в поперечном акустическом поле



## ДИФфуЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ ВОДОРОДА В СПУТНОЙ ВОЗДУШНОЙ СТРУЕ

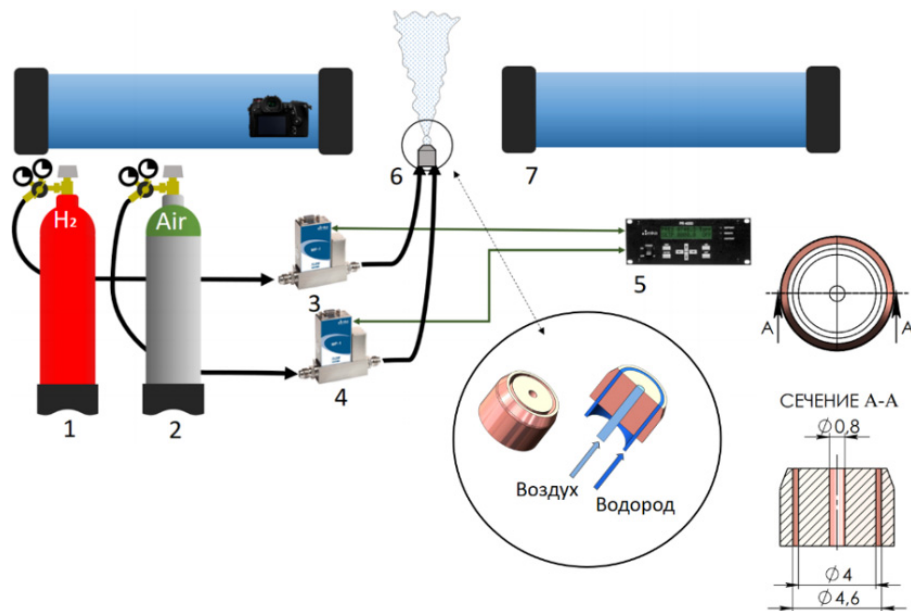
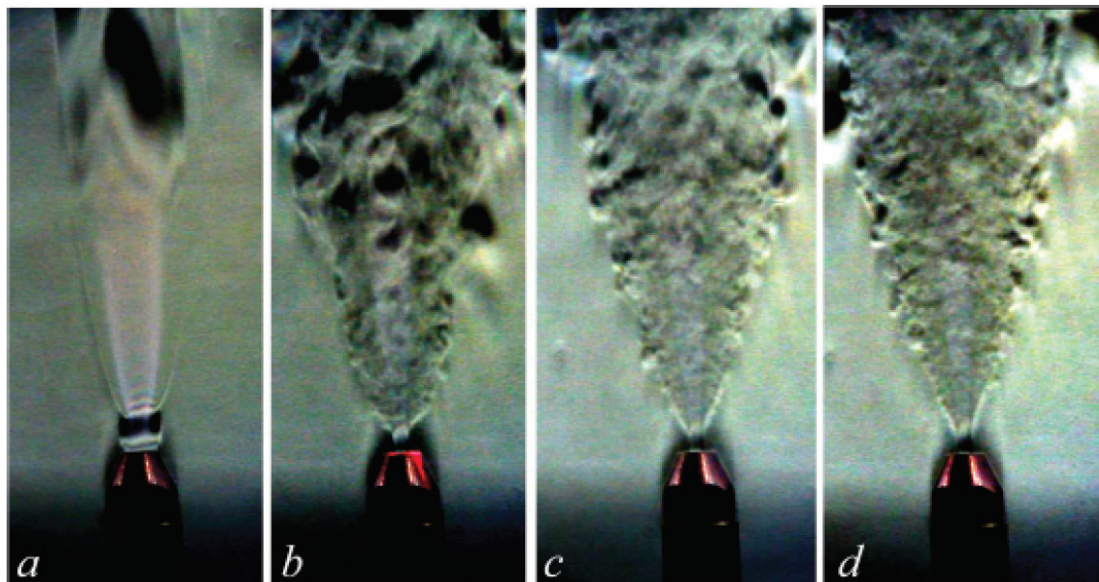


Схема эксперимента:

- 1 – водород, 2 – воздух,
- 3, 4 – регуляторы расхода газа,
- 5 – расходомер,
- 6 – сопловой аппарат,
- 7 – теневой аппарат Теплера

Теневые картины – стабилизация факела при диффузионном горении круглой микроструи водорода в спутной коаксиальной воздушной струе:

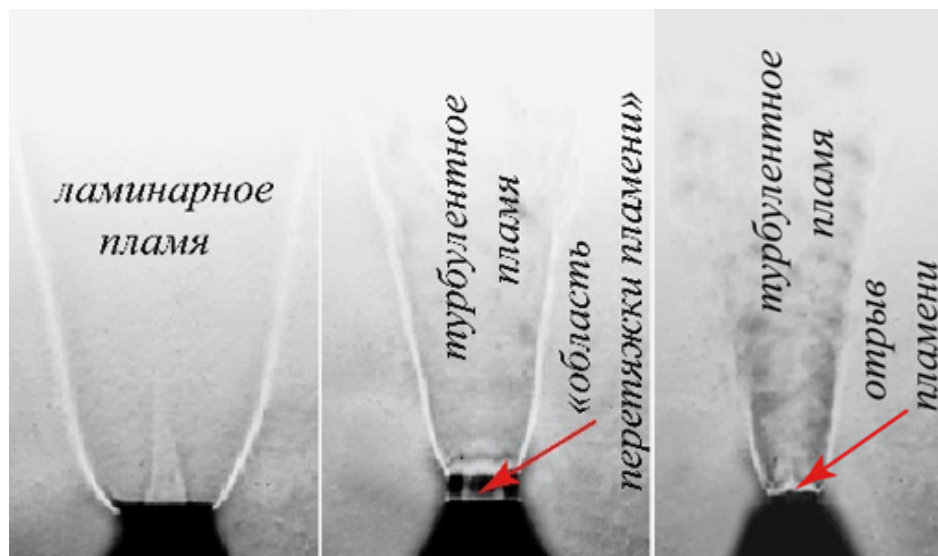
- a)  $U_H=130, U_{air}=0$  м/с,
- b)  $U_H=130, U_{air}=17,5$  м/с
- c)  $U_H=130, U_{air}=35$  м/с,
- d)  $U_H=204, U_{air}=18$  м/с.



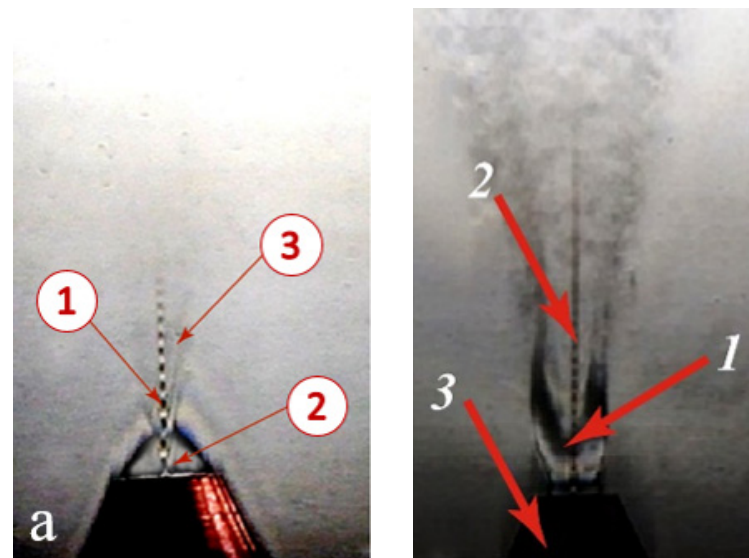
В турбулентных режимах горения (b, c, d) реализуется поднятый факел.



**КНП-2020:** 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.



Теневые картины затопленной горячей кольцевой струи водорода, истекающей с дозвуковой и сверхзвуковой скоростью в объем воздуха



Горение кольцевой струи водорода при наличии в центре микроструи воздуха, истекающей со сверхзвуковой скоростью (режимы при разной скорости истечения)





# Дальневосточный федеральный университет



## Международная лаборатория горения и энергетики

Образована в 2014 г. в рамках Мегагранта (профессор К. Марута, университет Тохоку, Япония), коллектив имеет 20 летний опыт сотрудничества с ведущими зарубежными и российскими лабораториями в области горения



**Цель исследований:** создание основ эффективных и экологически чистых технологий совместного сжигания угольных частиц и газообразного топлива, разработка технологий мультитопливной энергетики.



**КНП-2020:** 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; на основе ИК-спектрометрии получены данные о составе продуктов термического разложения угля при различной температуре. Выполнены тестовые эксперименты по исследованию воспламенения угольной пыли на пилотных установках. Разработаны схемы использования радиационных горелок для создания контролируемых радиационных потоков для горения угольно-воздушных смесей.

В составе исполнителей КНП: 2 доктора и 2 кандидата наук, 1 аспирант



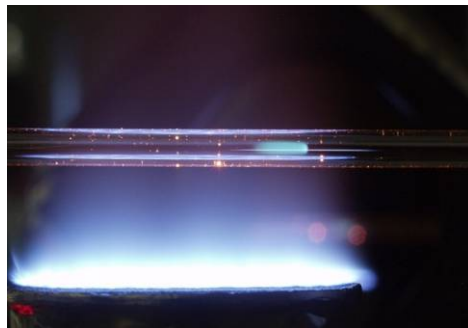


## Научный задел и методы

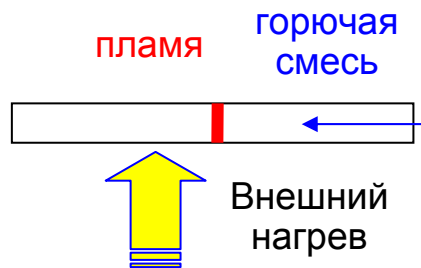


### Микропоточковый реактор для диагностики пламен, микрогорение

На основе исследований горения газа в микроканале с постоянным градиентом температуры в стенках, создан микрореактор для диагностики структуры пламени. Восстановление механизма химических реакций и данные о кинетических параметрах получены из сравнения данных о положении пламени относительно нагретых стенок микроканала с расчетами.



Микроканал с внешней горелкой

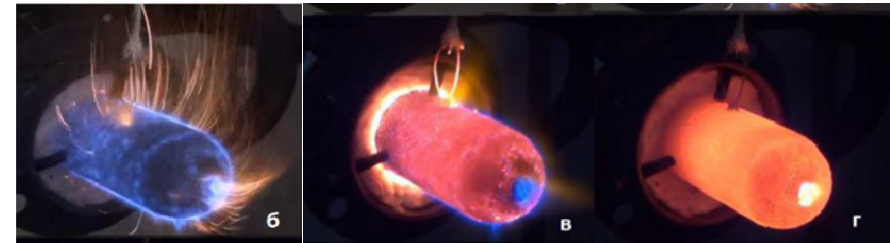


Ethylene ( $C_2H_4$ )	1120 K
Propylene ( $C_3H_6$ )	1193 K
1-Butene ( $C_4H_8$ )	1152 K
1-Pentene ( $C_5H_{10}$ )	1146 K

Пламена жидкого топлива с различным октановым числом

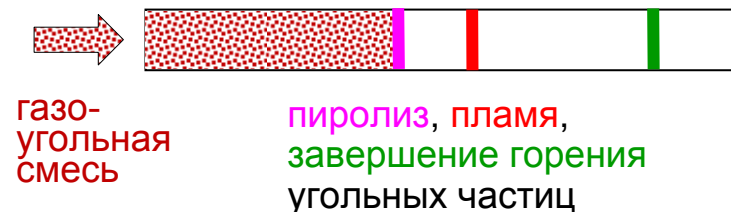
### Фильтрационное горение газов в пористой среде, радиационные горелки

Исследованы режимы горения газа в цилиндрической пористой горелке. Разработаны радиационные горелки с эффективностью преобразования тепла от горения газа в излучение – до 70%.



### Новый метод диагностики горения газо-угольных смесей в потоке излучения

Нагрев смеси ИК излучением от пористой горелки





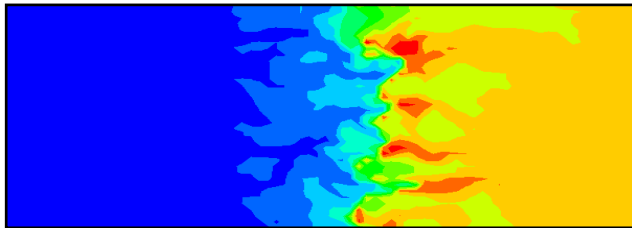
# Исследования и практические разработки



Сочетание методов термогравиметрии и ИК-спектроскопии, позволяет получить данные о пиролизе, составе продуктов и другие характеристики угля



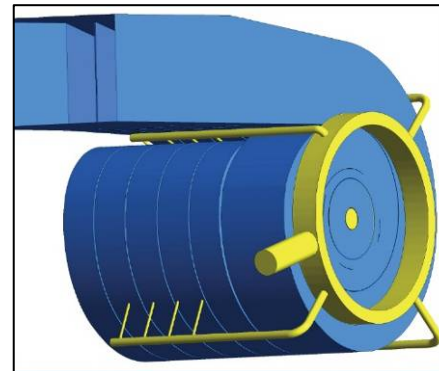
Установка для термогравиметрии



Впервые выполнено численное моделирование фильтрационного горения газов в пористой среде с описанием горения на уровне микропор. Созданы модели горения газа с каплями воды, которые будут использованы в моделях горения бинарных смесей.

Розжиг и подсветка пылеугольного факела излучением от радиационных горелок

Разрабатывается циклонно-вихревой предтопок для сжигания трех видов топлива: угля, газа и жидкого топлива



Совместные проекты IC&E Lab (ДВФУ) с ПАО РусГидро



Разработаны бытовые котлы с радиационными горелками



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

# Национальный исследовательский Томский политехнический университет



Основан  
в 1896 году

12,3 тыс. студентов и аспирантов, 10 исследовательских и инженерных школ, 3 научно-образовательных центра, 1275 научно-педагогических работников

**КНП-2020:** 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). Полученные данные позволяют обосновывать состав композиционных топлив и оптимизировать показатели горения.

В составе коллектива исполнителей КНП:

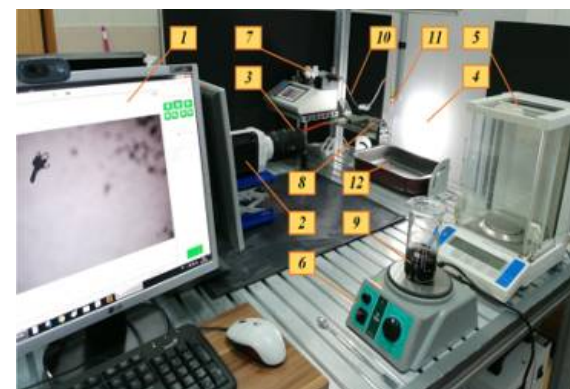
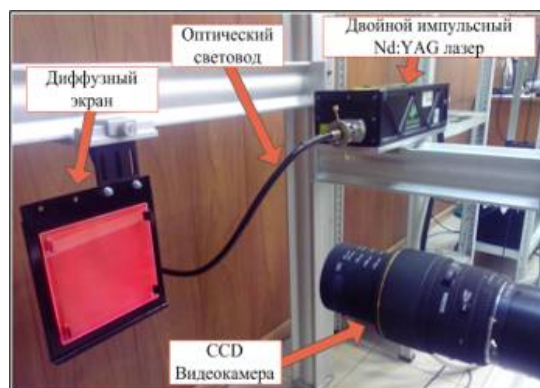
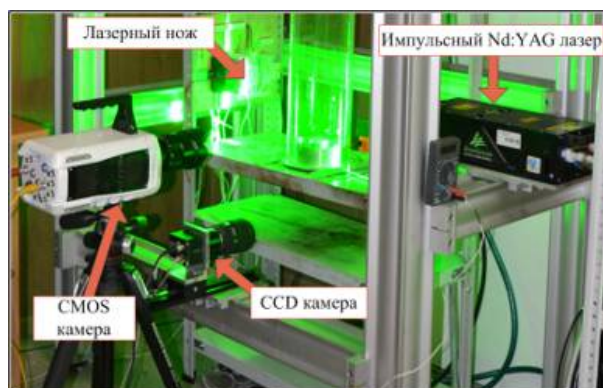
2 доктора и 7 кандидатов наук, 2 аспиранта, 3 лауреата Премии Правительства РФ



## Научный задел для целей проекта

Работа основных исполнителей проекта из ТПУ в последние годы ориентирована на участие в решении глобальной проблемы мирового сообщества «энергетической и экологической безопасности». Цель проведения исследований – обоснование эффективности перехода от сжигания углей в топках котлов к сжиганию композиционных топлив – водоугольных, органоугольных, смесей диспергированных углей и биомассы.

Создана современная лабораторная база, выполнены исследования в области создания и эффективного применения перспективных топлив на основе отходов угле- и нефтеперерабатывающей промышленности. Эти исследования поддержаны РНФ, РФФИ, Советом по грантам при Президенте РФ, ПАО «Газпром» и др.



По тематике КНП опубликовано более 30 статей в журналах Q1.

### Публикации по КНП-2020:

Vershinina K., Shevyrev S., Strizhak P. // Energy. 2021. Vol.219. 119606. **Q1 IF=6,082**

Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Fedorenko R.M., et al. // Powder Technology. 2021. Vol.382. **Q1 IF=4,142**

Antonov D.V., Vershinina K.Yu., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2021. Vol. 94, No. 4. **Q1**

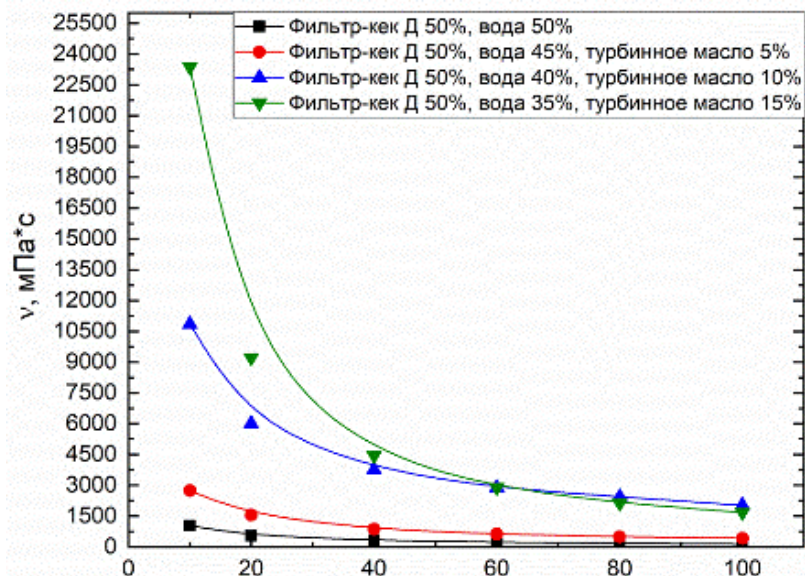




## Вязкость и стабильность топливных суспензий

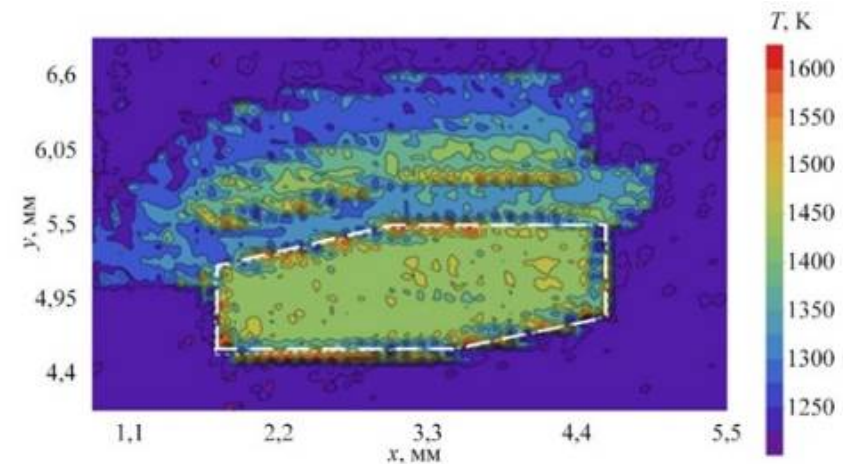
Показано, что вязкость большинства исследуемых смесей является допустимой для промышленного применения суспензий; масла выполняют роль стабилизатора эффективнее, чем добавки крахмала, гуаровой камеди, ксантановой камеди, неолола.

Из-за повышения вязкости смеси максимальная концентрация масла составляет 5%, биомассы – 2.5%. Суспензии на основе низкосортных углей малопригодны для хранения без перемешивания.

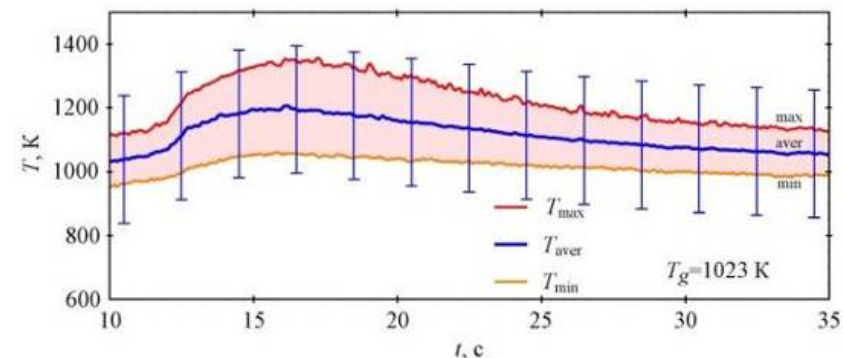


Зависимость вязкости суспензии от скорости сдвига (1/с) при варьировании доли жидкого горючего компонента

## Высокоскоростная двухцветная пирометрия



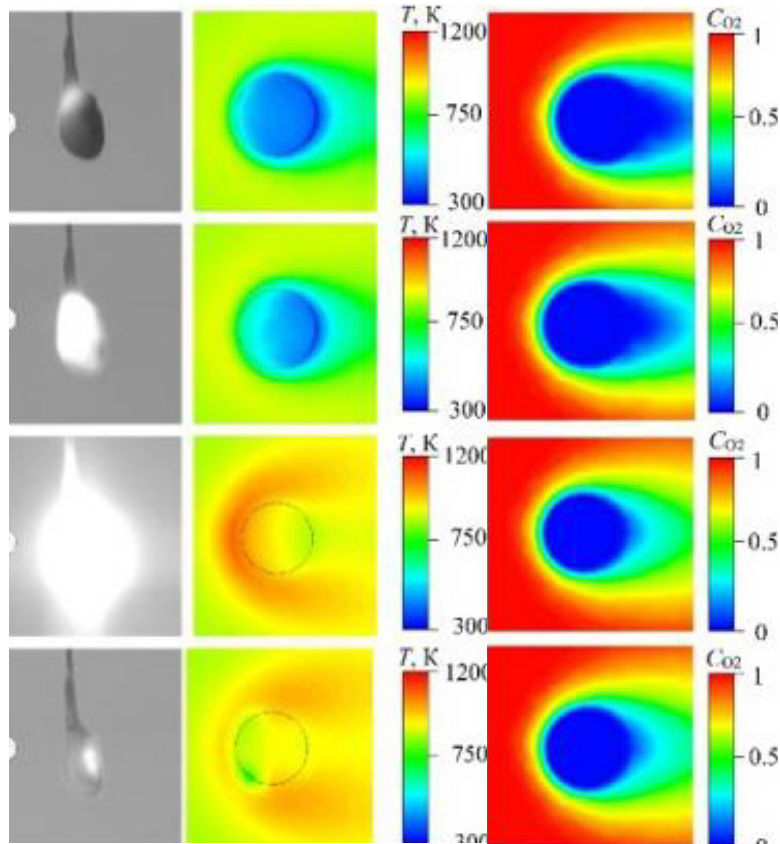
Поле температуры в системе «топливный пеллет – разогретый воздух» в процессе гетерогенного горения угля при  $T_g = 1123$  К



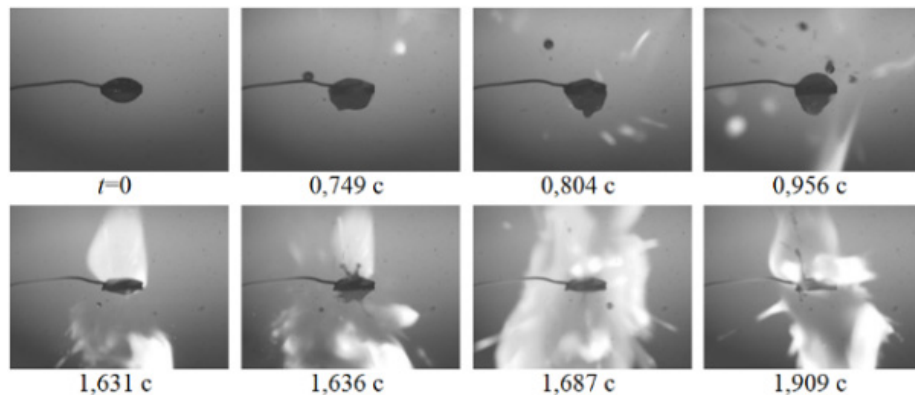
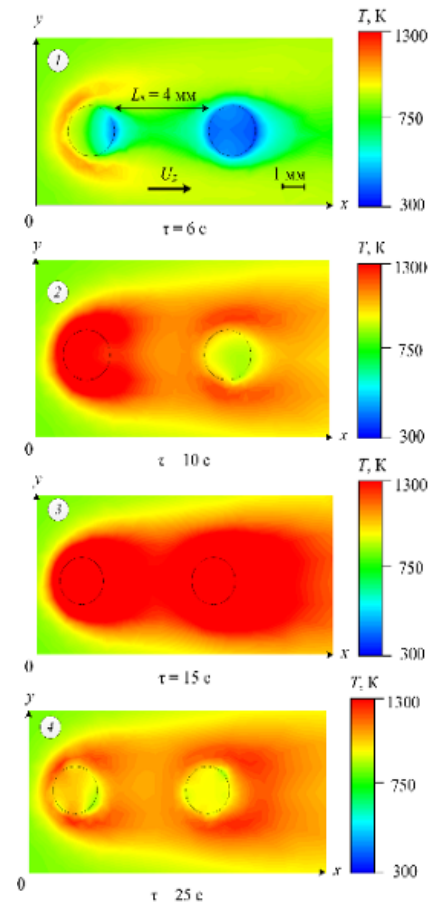
Тренды средней (синяя кривая), максимальной (красная кривая) и минимальной (оранжевая кривая) температур поверхности топливного пеллета в условиях его зажигания и горения



# Моделирование зажигания и горения органоугольного топлива



Расчет полей температуры и концентрации для одной и двух капель ОВУТ (90 % КЕК К, 10 % мазут) в потоке окислителя. Стадии: прогрева приповерхностного слоя капли, испарения влаги и выхода летучих; воспламенение в газовой фазе и прогрев углеродного остатка; гетерогенное горение углеродного остатка и распространение горения по всей поверхности обезвоженной капли топлива; интенсивное выгорание углерода.

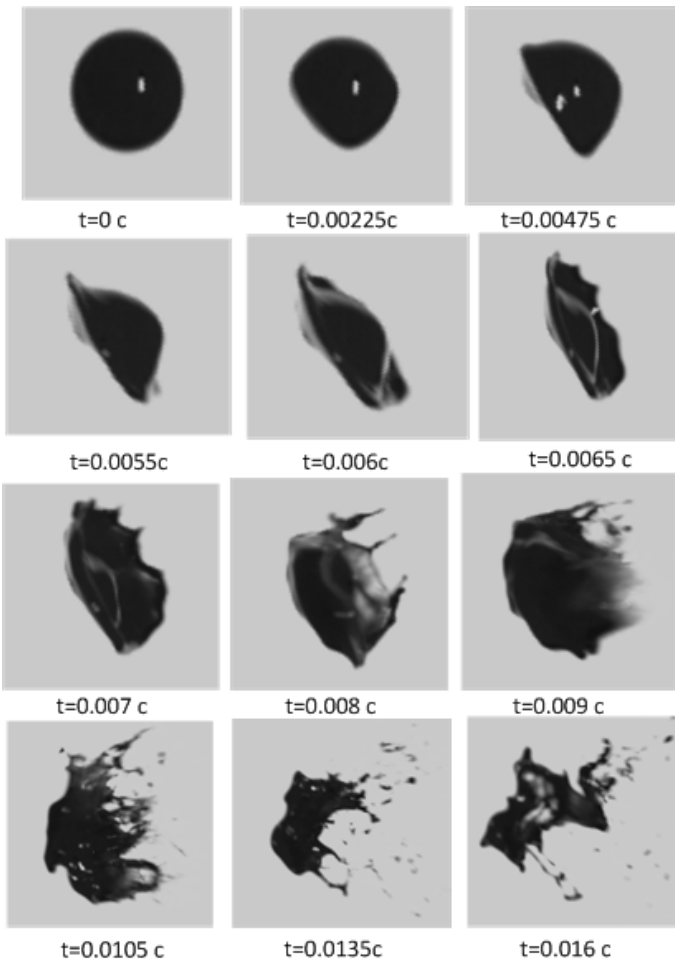
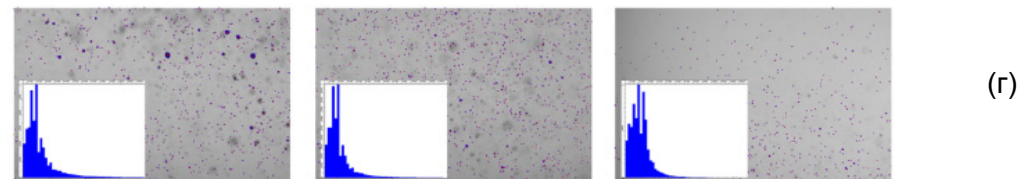
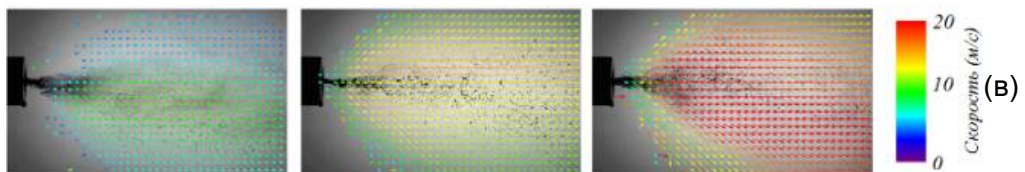
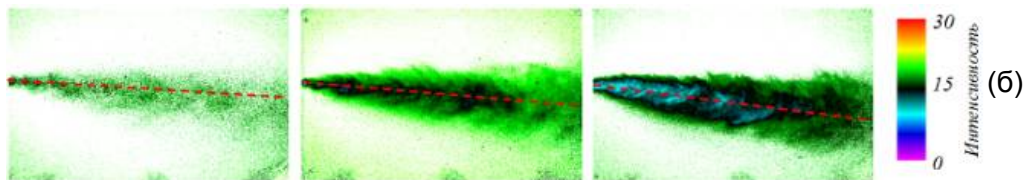
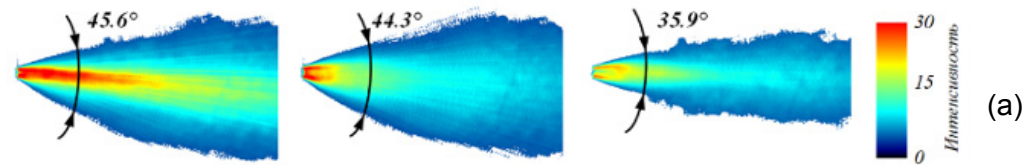


## Микро-взрывной режим

диспергирования каплей композиционного топлива наблюдается для эмульсий жидких нерастворимых компонентов, которые имеют близкие температуры кипения для обеспечения изотермических условий на поверхности раздела компонентов.



# Распыление и фрагментация органоводоугольных композиций и ВУТ



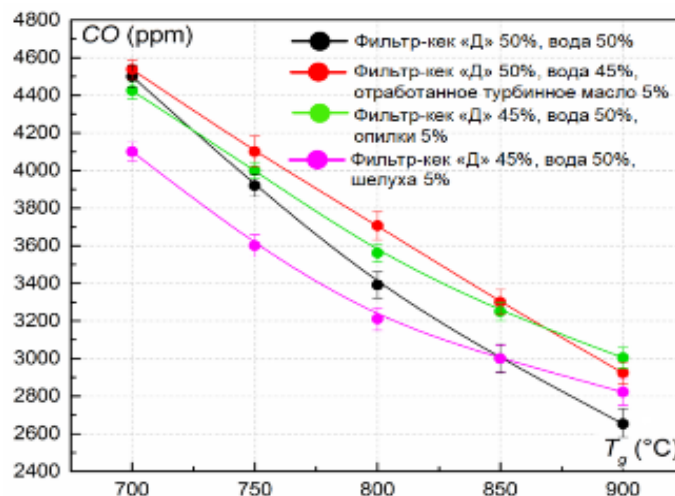
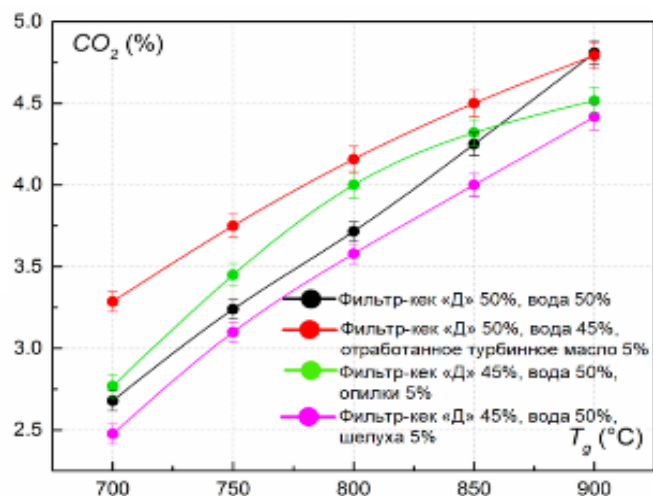
Примеры результатов исследования параметров газочапельных потоков : а – угол раскрытия струи; б – траектории движения капель и форма струи; в – скорость движения капель; г – размеры капель

Видеограммы разрушения капли ВУТ (фильтр-кек угля марки Д 50%, вода 50%) при воздействии на нее воздушным потоком со скоростью 15 м/с

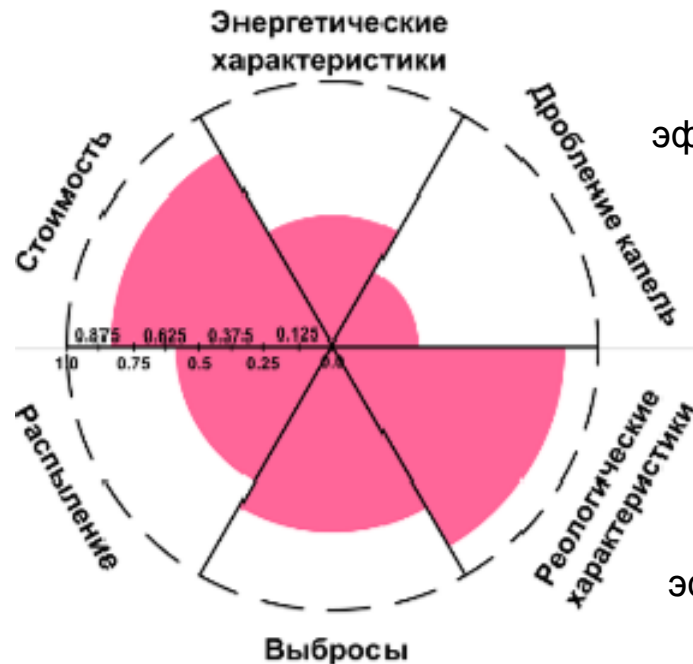
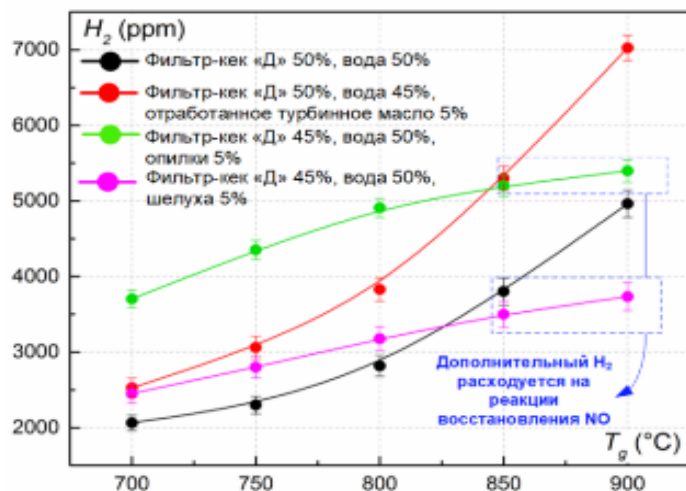




# Экологические характеристики горения и оценка эффективности органоводугольных топлив и ВУТ



Характерные зависимости концентрации оксидов углерода и водорода в продуктах сгорания ОВУТ



Составляющие итогового показателя эффективности топлива  
50% вода,  
50% фильтр-кек  
длиннопламенного  
угля

Итоговый показатель эффективности = 0,616





1931 г.

# Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН



**КНП-2020:** С целью определения детонационной способности (ДС) топливно-воздушных смесей (ТВС) методами перехода горения в детонацию и перепуска стационарной детонации в полуограниченные каналы спроектированы, изготовлены и запущены три экспериментальные установки. Разработанные установки не имеют мировых аналогов. С их помощью будут проведены фундаментальные исследования относительной ДС ТВС на основе газообразных и жидких горючих разной природы. Полученные результаты будут востребованы ввиду растущего

применения новых материалов в различных отраслях. Проведены исследования перехода горения в детонацию (ПГД) в стратифицированных системах типа газообразный окислитель – жидкое топливо (н-гептан и н-декан) в детонационных трубах различной длины. В зависимости от режимов проведения экспериментов зарегистрированы два типа ПГД, а также режимы высокоскоростного и низкоскоростного горения. Полученные результаты важны для вопросов промышленной безопасности и использования пленочного горения в перспективных энергопреобразующих установках.

В составе исполнителей КНП: 2 доктора и 5 кандидатов наук, 1 аспирант

Gasification of low-melting fuel in a high-temperature flow of inert gas // J. Propulsion & Power, 2021 **Q1 F=1,94**

Gasification of low-melting hydrocarbon material in the airflow heated by hydrogen combustion // International Journal of Hydrogen Energy, 2020 **Q1 IF=4,939**

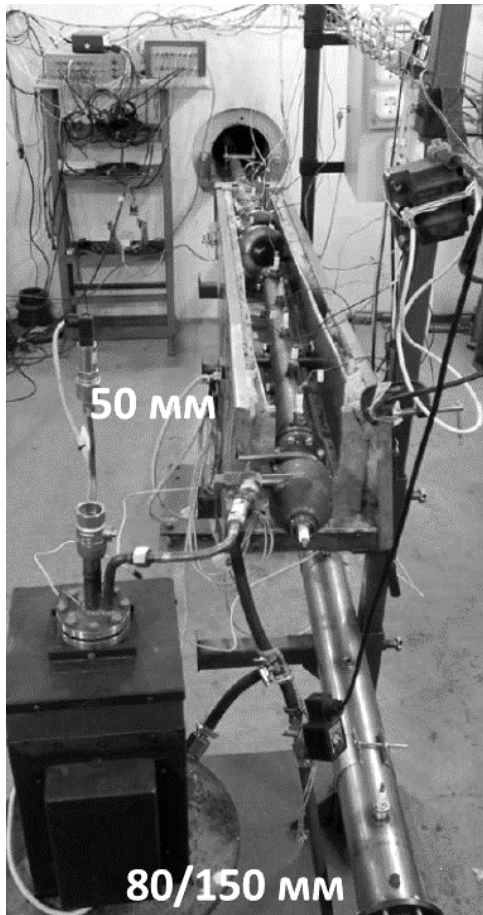
Deflagration-to-detonation transition in stratified oxygen – liquid fuel film systems // Combustion Science and Technology **Q1 IF=1,73**

Detonability of fuel–air mixtures // Shock Waves, 2021 **Q2 IF=1,248**

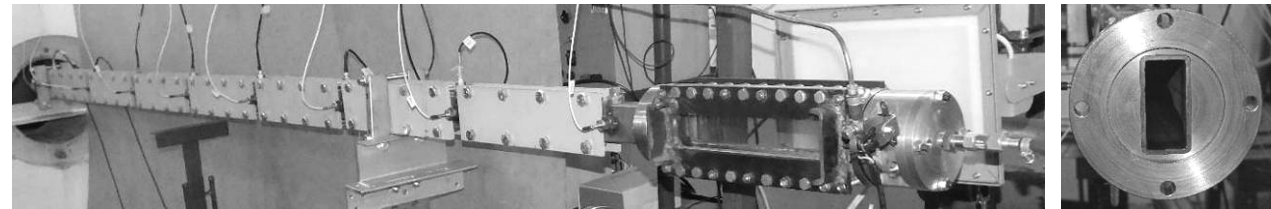


# ДЕТОНАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ СМЕСЕЙ ГАЗООБРАЗНЫХ И ЖИДКИХ ГОРЮЧИХ С ВОЗДУХОМ И O<sub>2</sub>: УСТАНОВКИ

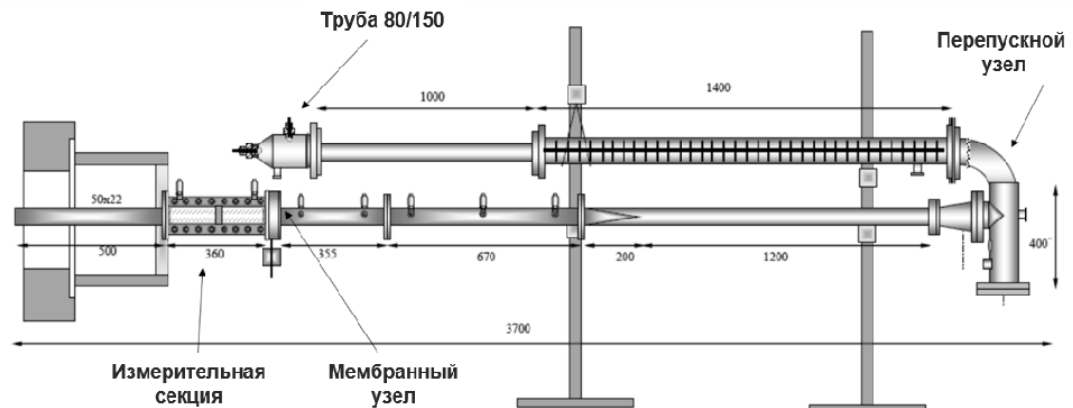
**Фундаментальная научная задача:** определение относительной детонационной способности газовых и жидких горючих методами перехода горения в детонацию и перепуска детонации для применения в новых системах реактивного движения



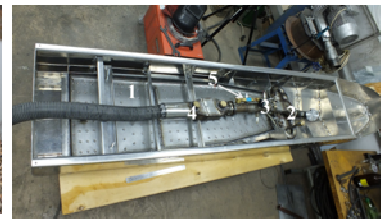
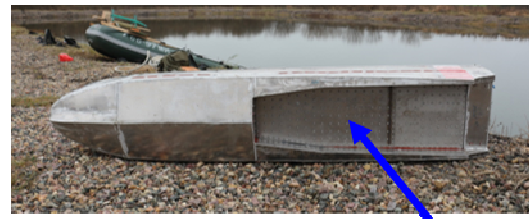
Эталонная импульсно-детонационная труба



Плоский канал с оптическим доступом



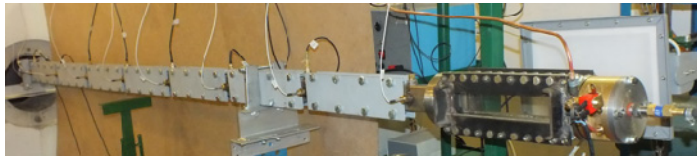
Канал с перепуском детонации в полуограниченный объем



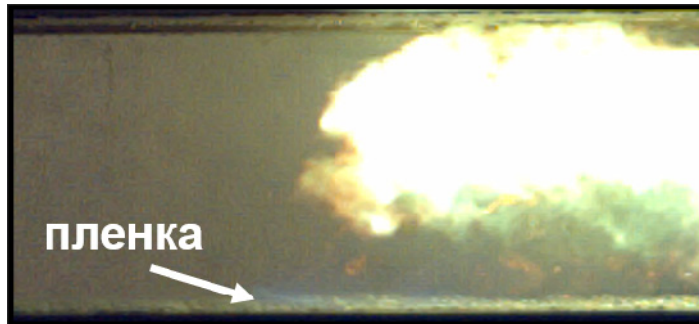
Газовая каверна под днищем катера



# ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В КАНАЛЕ С ПЛЕНКОЙ ЖИДКОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ГОРЮЧЕГО

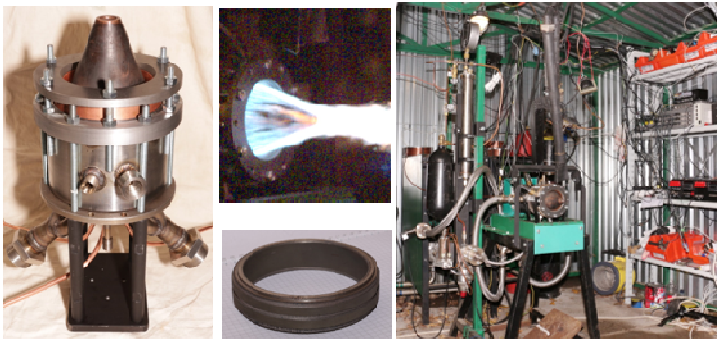
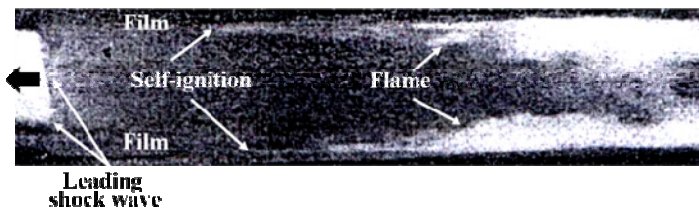


На дне канала: пленка н-декана толщиной 0,5 мм в объеме: кислород; зажигание: взрыв проволоочки

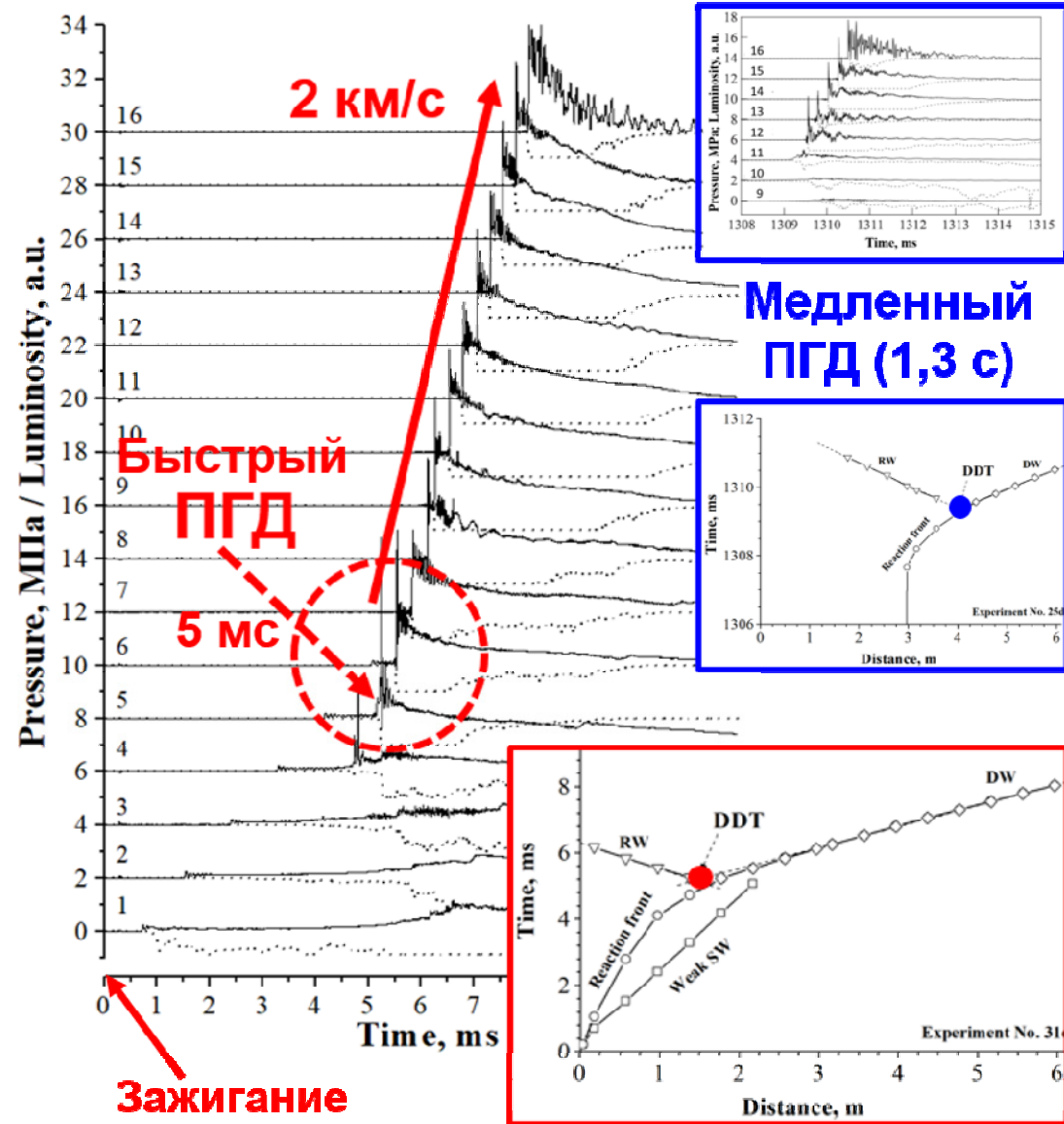


пленка

Начальная стадия перехода горения в детонацию



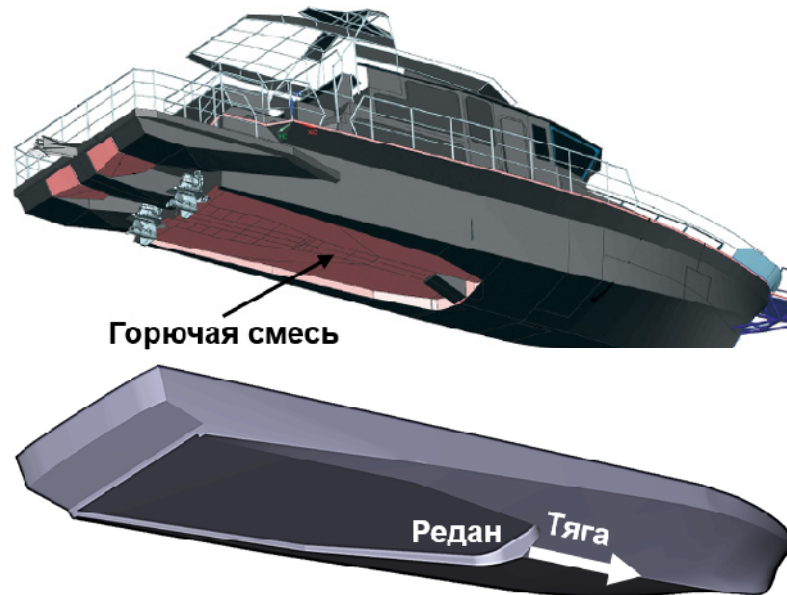
Ракетный двигатель на пленочной детонации





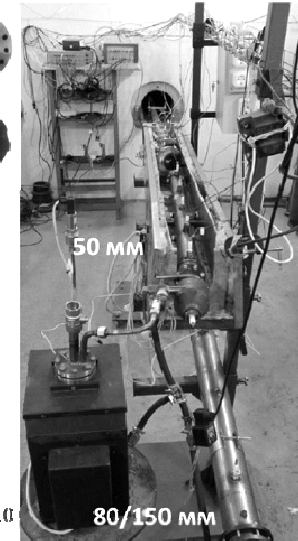
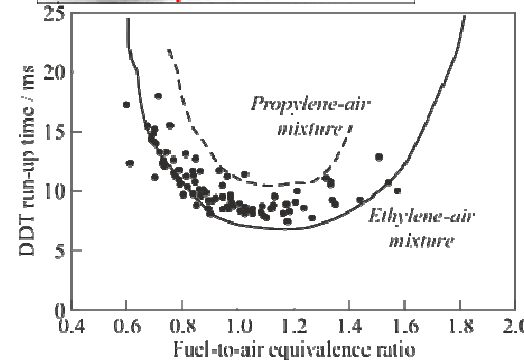
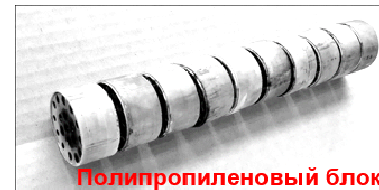
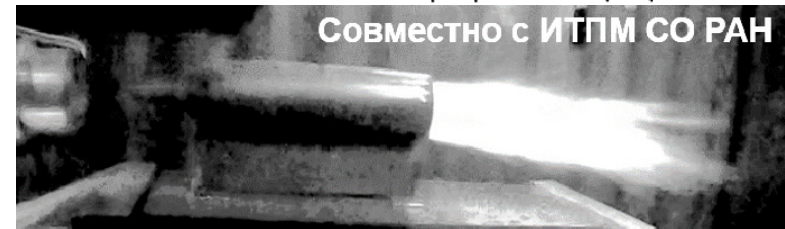
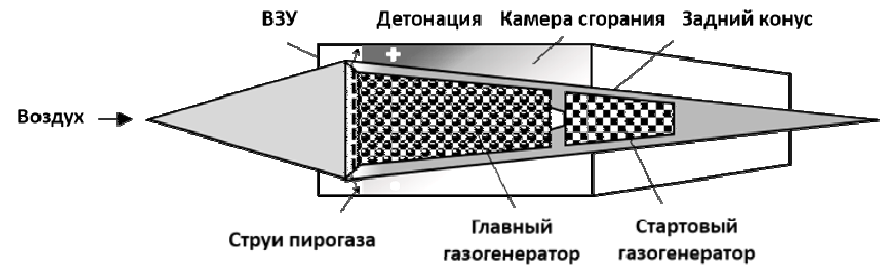


# ПЕРЕПУСК ДЕТОНАЦИИ В ГАЗОВУЮ КАВЕРНУ ПОД ДНИЩЕМ КАТЕРА (НОВЫЙ ТИП ДВИЖИТЕЛЯ)



Статья направлена в Shock Waves, 2021

# ДЕТОНАЦИОННЫЙ РАКЕТНО-ПРЯМОТОЧНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ (НОВЫЙ ТИП ДВИГАТЕЛЯ)



Int. J. Hydrogen Energy, Propulsion & Power (2020, 2021)





# Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН



Образован в 1957 г. в числе первых 10 институтов  
Сибирского отделения АН СССР

Основные научные направления:

- математические проблемы механики сплошных сред;
- физика и механика высокоэнергетических процессов;
- механика жидкостей и газов;
- механика деформируемого твердого тела.



КТ Филиал ИГиЛ СО РАН: выпуск оборудования для утилизации отработанных ТВЭЛов

Работали: 10 академиков, 5 членов-корреспондентов Академии наук

Подготовлено: более 200 кандидатов наук и более 130 докторов наук

Премии: 5 лауреатов Ленинских премий, 14 лауреатов Государственных премий,

7 лауреатов Премий Правительства, 9 лауреатов Премий Ленинского комсомола,

11 лауреатов академических премий

Институт награжден Орденом Трудового Красного Знамени

В составе исполнителей КНП: 4 доктора и 2 кандидата наук, лауреат Гос. премии РФ



# НЕПРЕРЫВНАЯ ДЕТОНАЦИЯ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В КОЛЬЦЕВЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ



Экспериментальный стенд с детонационной камерой сгорания (ДК-500)

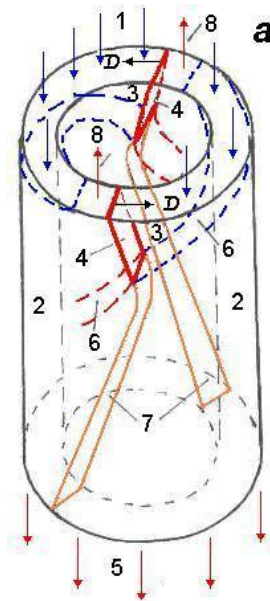
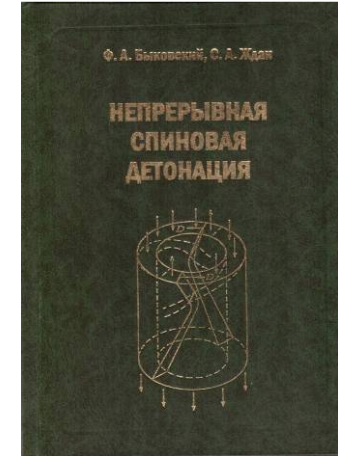
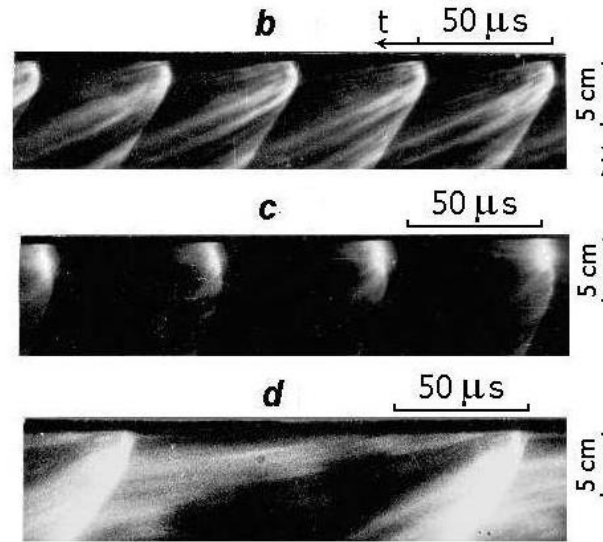
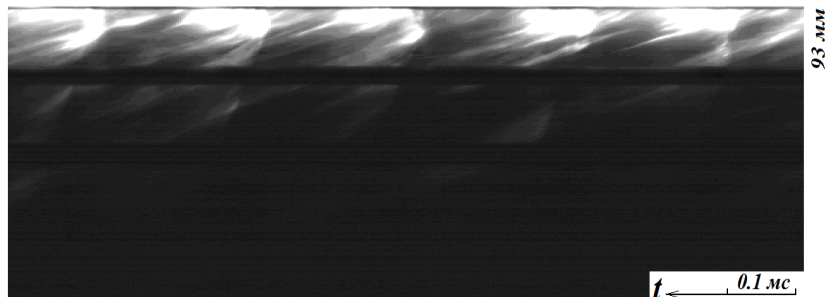


Схема непрерывной спиновой детонации (а).

Фоторегистрограммы поперечных детонационных волн в разных горючих смесях: СЗН8/О2 (b); ацетон/О2 (c); керосин/О2 (d) в камерах типа ЖРД ( $d_c = 100$  мм;  $d_c = 40$  мм).



Быковский Ф.А., Ждан С.А. Непрерывная спиновая детонация. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.

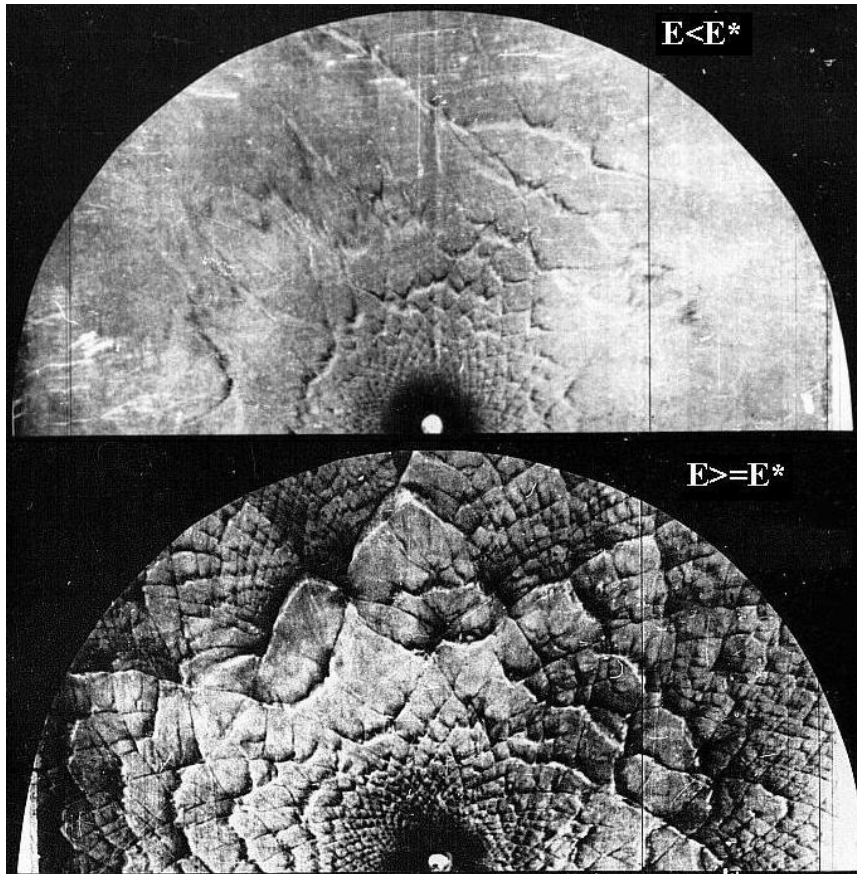


Высокоскоростная видеосъемка непрерывной спиновой детонации (камера Photron Fastcam SA1.1 675K-M3). Фрагмент фоторегистрограммы пятиволнового режима НСД смеси керосин/водород - воздух в ДК-500: расход воздуха  $G_a = 14$  кг/с;  $D = 1.48$  км/с; частота  $f = 4.86$  кГц.



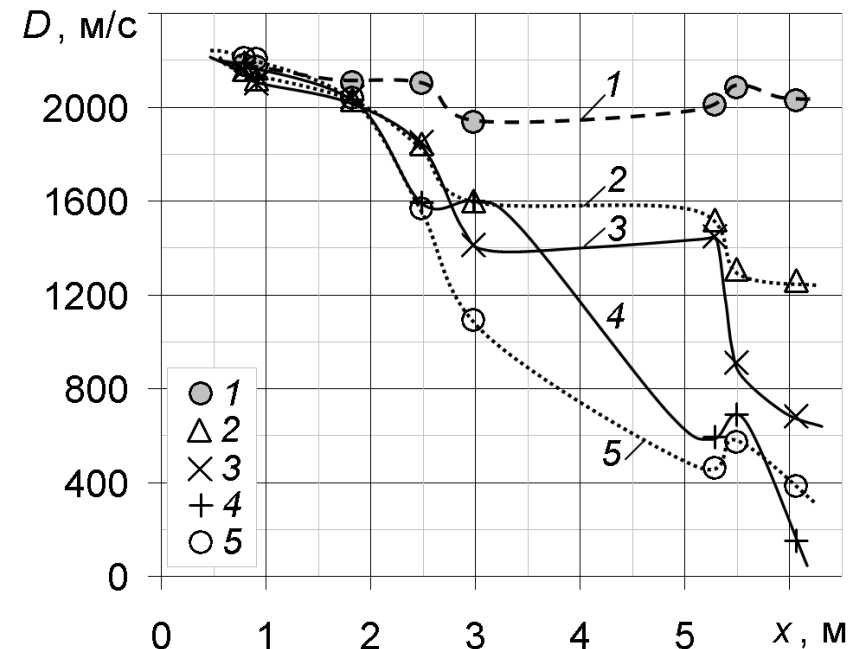
## ЗАДЕЛ, МЕТОДЫ

Газовые и гетерогенные горючие смеси, **инициирование** волн горения и детонации, распространение, структура, воздействие, моделирование, взрывобезопасность, многотопливные системы и их кинетика, бифуркационные структуры, **подавление** взрывных волн



Используемые методики и оборудование: импульсные датчики давления, свечения, ионизации, ФЭУ, высокоскоростная киносъемка, теневая и следовая методики, осциллографы, частотомеры, блоки синхронизации, источники электропитания...

Экспериментально показана принципиальная возможность гашения детонации и последующего полного срыва горения с помощью завесы из мелкодисперсных пылевых частиц (гашение шахтных взрывов - обеспечение безопасности).

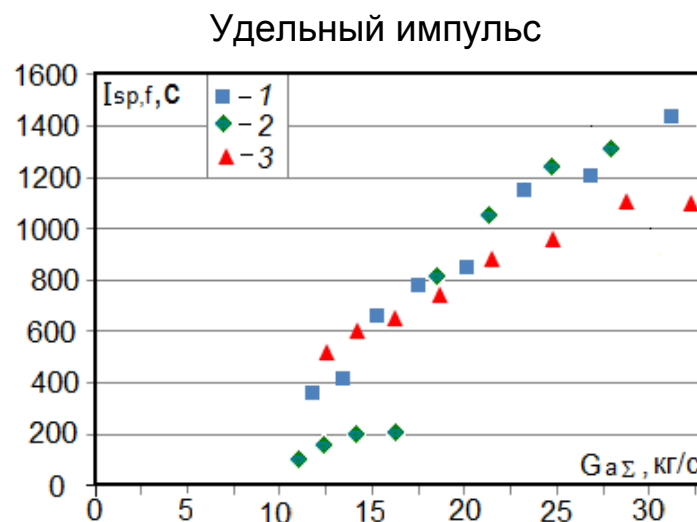
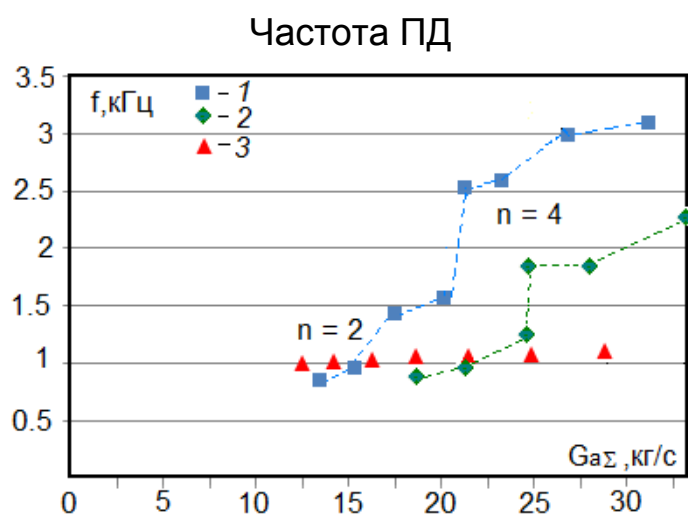






## ДЕТОНАЦИОННЫЕ РЕЖИМЫ ГЕТЕРОГЕННОЙ СМЕСИ КЕРОСИН – ВОЗДУХ

**КНП-2020:** 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. Получены зависимости параметров поперечных детонационных волн, детонационной способности смеси, силы тяги и удельного импульса от геометрии камеры сгорания и расхода воздуха. Установлено, что барботирование керосина воздухом обеспечивает лучшее дробление капель керосина на выходе из форсунки и способствует реализации детонационных режимов сжигания смеси.



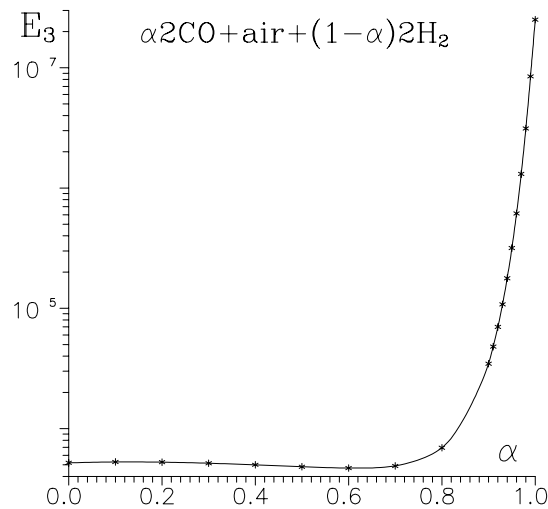
Зависимость от расхода воздуха при различной геометрии камеры сгорания:  
1 –  $\delta = 3.5$  мм,  $K_{ex} = 2.96$ ; 2 –  $\delta = 3.5$  мм,  $K_{ex} = 1.74$ ; 3 –  $\delta = 10.5$  мм,  $K_{ex} = 2.96$ .



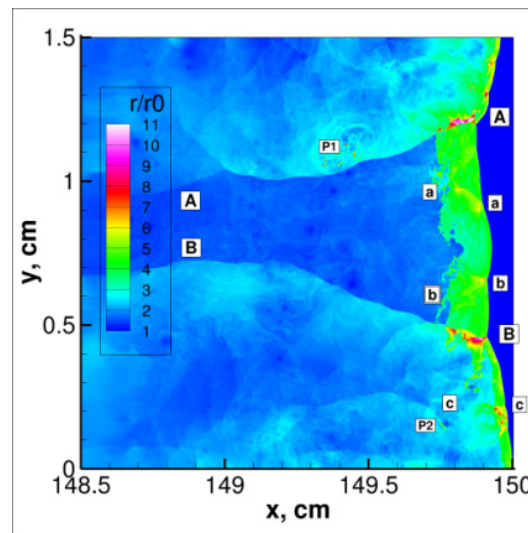


## ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ СИНТЕЗ-ГАЗ + ВОЗДУХ

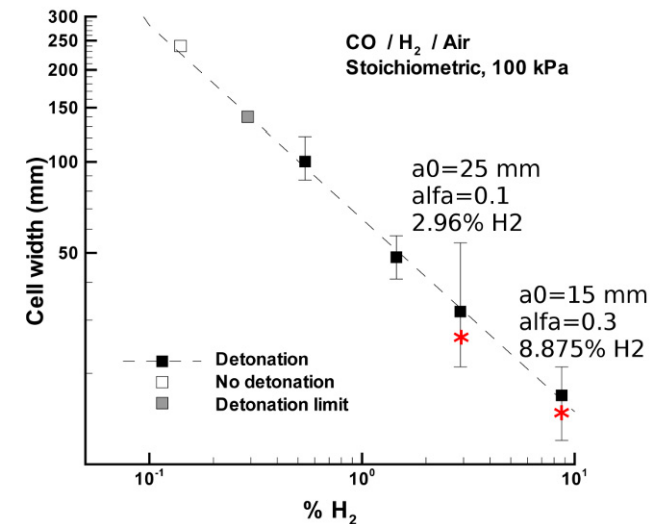
**КНП-2020:** Определены кинетические параметры и рассчитаны газодинамические (давление, температура, плотность, состав продуктов) и энергетические (критическая энергия инициирования детонации, удельное энерговыведение) характеристики двухтопливной системы CO+H<sub>2</sub>+Air при различных начальных давлениях, температурах, концентрациях топлива и соотношениях компонент синтез-газа. Показано, что результаты на основе существующих схем детальной кинетики плохо согласуются с экспериментами. Обнаружен сильный промотирующий эффект добавок H<sub>2</sub> на детонационную кинетику смесей CO+Air.



Зависимость критической энергии инициирования сферической детонации (Дж) от доли CO обнаруживает сильный промотирующий эффект малых добавок H<sub>2</sub> на детонационную кинетику смесей CO+Air



Численное моделирование структуры 2D детонации двухтопливной смеси 0,7 CO + 0,3 H<sub>2</sub> + 0,5 Air на основе разработанной модели детонационной кинетики (плотность)

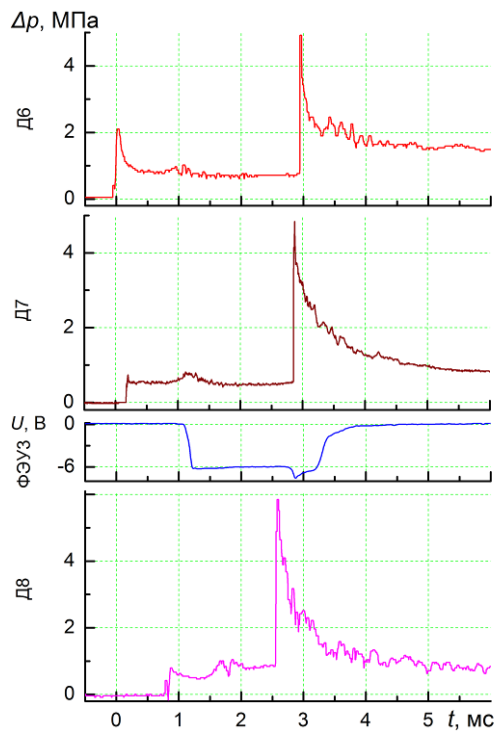


Соответствие рассчитанных значений поперечных размеров детонационных ячеек (красные символы) известными экспериментальными данными для стехиометрической смеси синтез-газа с воздухом



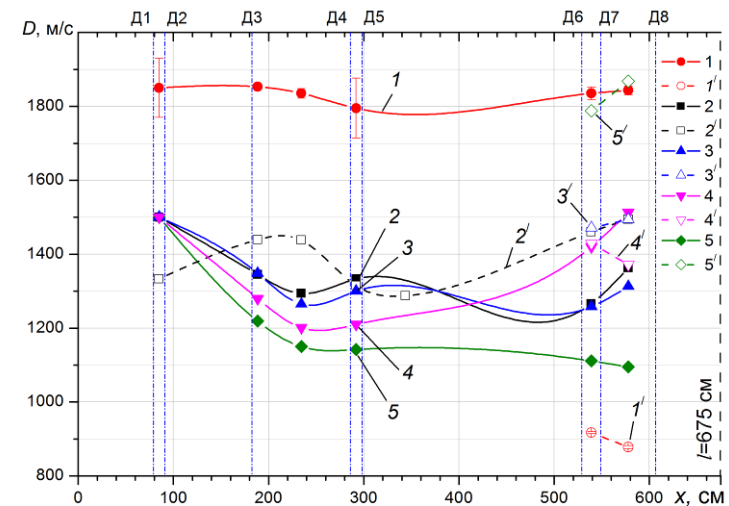
# ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ И ДЕТОНАЦИИ В ДВУХТОПЛИВНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ, СОДЕРЖАЩИХ МЕТАН И УГОЛЬНУЮ ПЫЛЬ

**КНП-2020:** Экспериментально определены параметры и структура и динамика волн горения и детонации в системах, содержащих метан и взвесь мелкодисперсного угля (частицы менее 200 мкм). Показано, что угольная пыль ослабляет детонационную волну в газовой стехиометрической смеси и определяет характер отраженной детонационной волны. При различных условиях установлено, что за фронтом взрывных и детонационных волн в гетерогенных системах происходит лишь воспламенение и горение частиц угля, доля сгоревшего угля не превышает 20-30%.



Профили давления и свечения в падающих и отражённых волнах в смеси  $\text{CH}_4 + 10.52\text{Air} + \text{взвесь угля}$ ,  $p_{0i} = 0.25 \text{ МПа}$ ,  $\rho \approx 530 \text{ г/м}^3$ .

Поскольку метан химически активнее частиц угля, то определяющее влияние на параметры волн горения и детонации оказывает метан, а не углерод угля.



Скорости падающих (1÷5) и отражённых (1'÷5') детонационных волн по длине трубы,  $p_0 = 0.1 \text{ МПа}$ ,  $p_{0i} = 0.25 \text{ МПа}$ ,  $w_i \approx 19.2 \text{ МДж/м}^2$ : газовая смесь ( $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\text{N}_2$ ) – (1, 1'); гетерогенная смесь ( $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 6\text{N}_2$ )/уголь  $\rho \approx 179$  (2, 2'), 252 (3, 3'), 500 (4, 4'), 515 (5, 5') г/м<sup>3</sup>.



# МГУ имени М.В. Ломоносова

## НИИ Механики МГУ



НИИ МЕХАНИКИ  
МГУ

Институт организован Постановлением Совета Министров РСФСР от 11 декабря 1959 года № 1936

Результаты Института нашли важнейшие применения в ракетно-космической, авиационной, военно-морской технике и в иных областях оборонного и народно-хозяйственного комплексов.



Руководитель работ по КНП:

Левин В.А., зав.лаб., академик РАН,  
лауреат Государственной премии РФ (2002),  
премии С.А. Чаплыгина (1975), премии Н.Е. Жуковского (1981),  
премии М.В.Ломоносова I степени (1991),  
награжден Орденом Почета (2011),  
Медалью ордена «За заслуги перед отечеством» II степени (1999),  
Медалью Н. Мансона (2013)

В составе исполнителей проекта: 3 доктора и 3 кандидата наук, 2 лауреата Государственной премии РФ



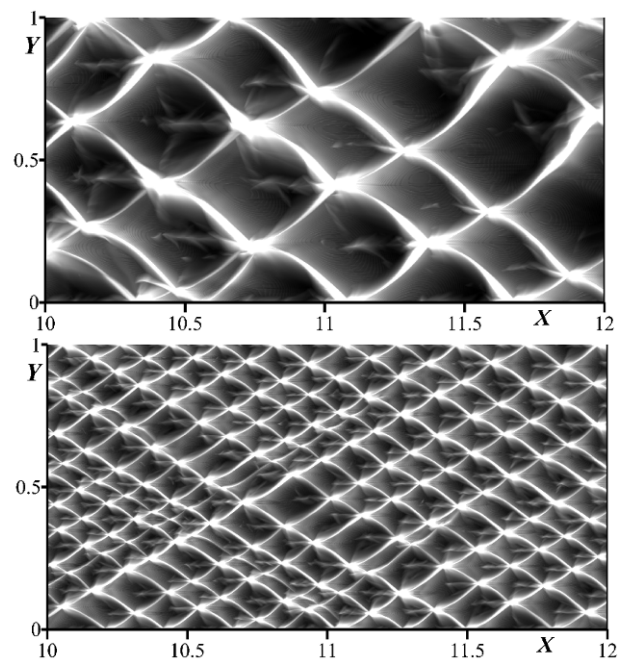
газодинамический блока импульсной  
аэродинамической установки



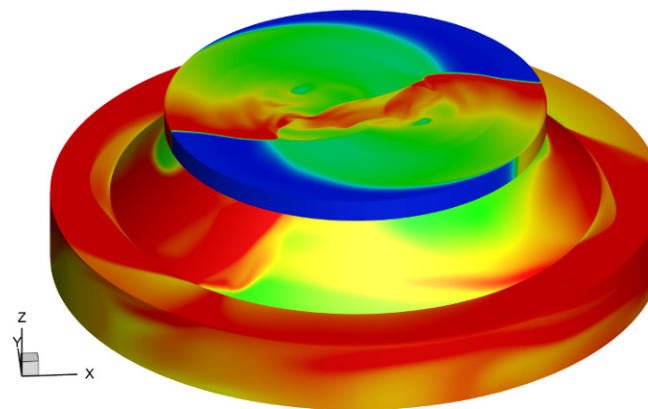
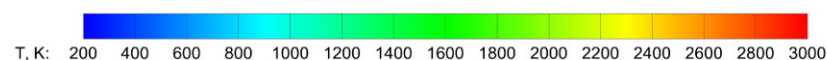
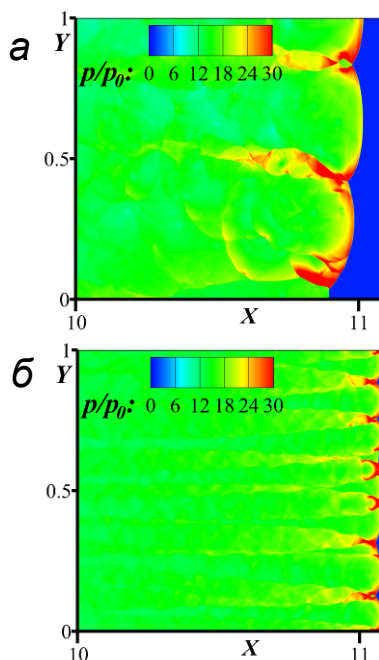


**КНП-2020:** Разработаны новые математические модели и созданы современные программные комплексы для исследования многомерных нестационарных течений реагирующих многокомпонентных газовых смесей со скачками уплотнения. Используется несколько детальных кинетических механизмов окисления водорода и углеводородов в смесях с кислородом и инертными добавками. Модернизирован графический интерфейс, обеспечивающий управление условиями задач и методами решения для проведения параллельных вычислений на суперкомпьютерах.

Тестирование на задачах о распространении ячеистой детонации в плоском канале, заполненном стехиометрической смесью  $H_2+O_2$  аргоном, и об ударно-волновом инициировании детонации в покоящейся горючей газовой смеси, содержащей эллиптическую область, заполненную тяжелым инертным газом, показало адекватность модели и численного метода. Оригинальный программный комплекс с графическим интерфейсом адаптирован к суперкомпьютеру «Ломоносов-2».



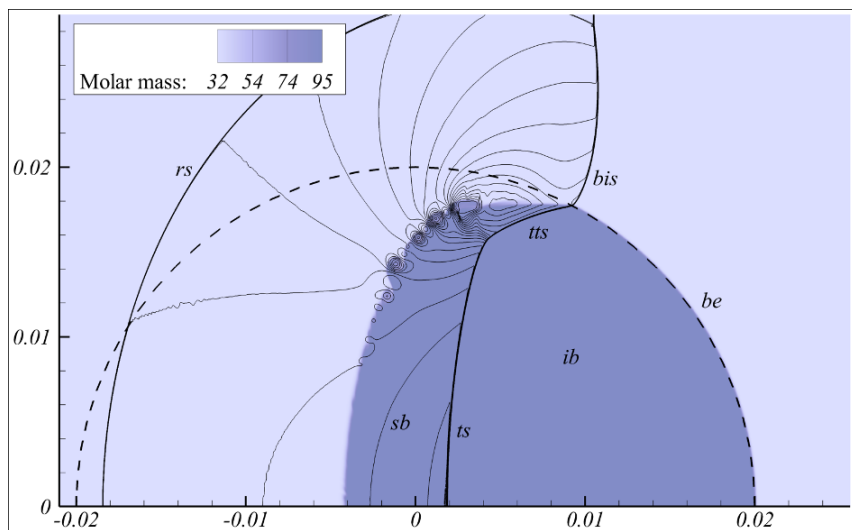
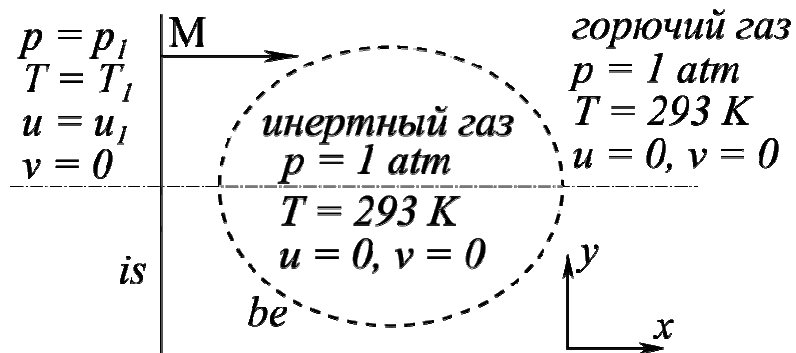
Моделирование ячеистой структуры детонационной волны в плоском канале в водородно-воздушной смеси (а) и в смеси с добавлением озона (б)



Две детонационные волны, вращающиеся в кольцевом зазоре между пластинами при подаче стехиометрической пропановоздушной смеси в направлении оси симметрии через внешнее кольцо с микросоплами

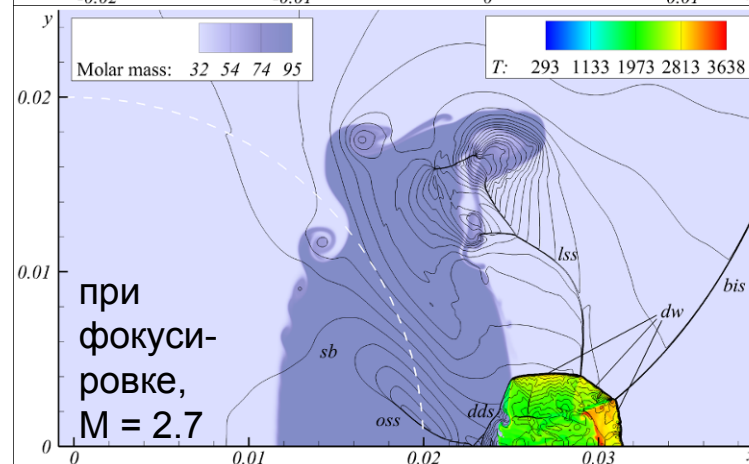
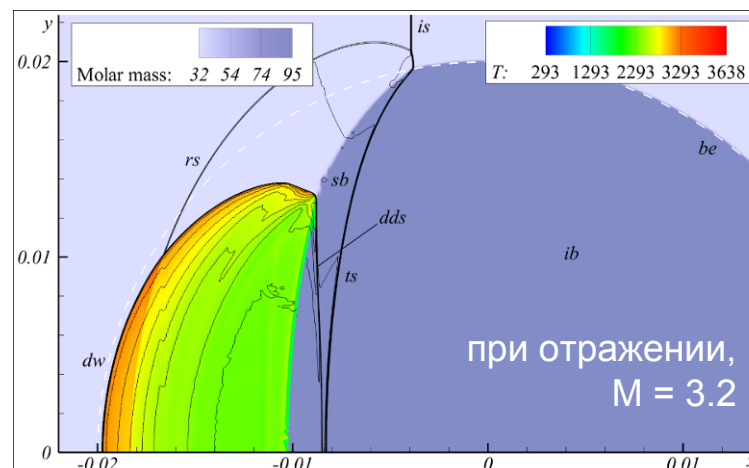


# ДЕТОНАЦИЯ ГОРЮЧЕЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ ПРИ ФОКУСИРОВКЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ТЯЖЕЛОМ ИНЕРТНОМ ПУЗЫРЕ



Эллиптический пузырь тяжелого инертного газа. Волна в пузыре замедляется, преломляется и затем фокусируется на плоскости симметрии. Численное моделирование: уравнения Эйлера, двухстадийная кинетика горения Коробейникова-Левина, число Маха  $M$  от 2.5 до 3.5.

Три режима инициирования детонации:  
- очень сильная ударная волна – прямое,  
- волна «средней силы» – при отражении,  
- «слабая» волна – при фокусировке ударной волны с уменьшением критического числа Маха с 3.1 до 2.6



**Задание в рамках КНП на 2020 год:** Выполнить фундаментальные исследования и получить следующие результаты:

- изотропная гильберт-визуализация вихревых структур, возникающих в слое смешения струи газа  $400 < Re < 1900$ , распределения средней скорости и её пульсаций в импактной струе в области струйного и пристенного движения газа, условия срыва пламени в спутном или поперечном потоке в зависимости от состава топливной смеси при воздействии суперструктур, механизмы управления горением в условиях воздействия на поток вихревых образований в процессе ламинарно-турбулентного перехода;
- характеристики диффузионного горения микроструи водорода при дозвуковом и сверхзвуковом истечении;
- метод эффективного удаления воды из слоя при горении двойных газовых гидратов с кратным уменьшением выбросов оксидов азота;
- анализ аэротермохимической структуры потока, экологические характеристики факела на основе численного моделирования процессов турбулентного горения метана в тракте и факеле осесимметричной горелки при вдуве струи перегретого водяного пара (с учетом подробной кинетики химического реагирования для многокомпонентной газовой смеси, лучистого теплопереноса, процессов сажеобразования и образования оксидов азота, и для условий недостатка воздуха в горелочном тракте);
- закономерности диффузионного горения дизельного топлива при впрыске перегретого водяного пара в зону горения с управляемым коэффициентом избытка воздуха;
- методика измерения объемного содержания сажи на основе метода лазерно-индуцированной инкандесценции и результаты численного моделирования сажеобразования для ламинарных углеводородных пламен (с контролируемыми начальными условиями);
- влияние добавок кислородсодержащих соединений углерода (оксигенатов) в жидкое углеводородное топливо на процессы образования сажи и полициклических ароматических углеводородов в продуктах горения;
- кинетические механизмы образования окиси углерода при окислении биоспиртов и эфиров;
- описание структуры расходящегося пламени и определение роли формируемых акустических полей в динамике горения газообразных и дисперсных смесей;
- интегральные характеристики горения в условиях нормальной и реверсной гравитации;
- методика измерения задержки воспламенения перспективных высокоэнергетических углеводородных соединений (жидких или твердых при н.у.);
- кинетические характеристики угольного топлива различной степени метаморфизма и закономерности сопряженных тепло- и массообменных процессов при воспламенении и термическом разложении топлива (с применением моделей на базе искусственных нейронных сетей);
- метод изучения процессов фильтрационного горения бинарных топливно-воздушных смесей (угольная пыль + метан, пропан) в прямоточном реакторе в условиях внешнего радиационного теплового потока;
- обоснование перспективных составов композиционных топлив (компоненты, концентрации, методы приготовления и транспортировки), оптимальные характеристики распыления топлив при разных режимах сжигания.
- новые математические модели и оригинальные программные комплексы с применением передовых численных методов для высококачественного моделирования широкого круга течений горючих смесей, в том числе в трактах перспективных энергетических установок сложной конфигурации;
- уникальные (не имеющие мировых аналогов) установки для определения детонационной способности топливно-воздушных смесей методом перехода горения в детонацию и перепуска стационарной детонационной волны в полуограниченный плоский канал изменяемой геометрии;
- режимы сгорания гетерогенной смеси керосин - холодный воздух при варьировании состава смеси и геометрии камеры сгорания  $d=0.5\text{м}$ ;
- газодинамические и энергетические характеристики многотопливной системы синтез-газ+воздух при различном начальном давлении, температуре и концентрации топлива;
- численное моделирование многофронтной структуры детонационной волны в смеси синтез-газ+воздух, структуры волн горения и детонации в системах, содержащих метан и взвесь мелкодисперсного угля.

Работы выполняются в рамках Соглашения № 075-15-2020-806 от 29.09.2020

В составе участников в 2020 году: 4 члена РАН, 32 докт.наук, 54 канд.наук.  
(в том числе лауреаты Государственных премий РФ, Премий Правительства РФ)

Плановые показатели	2020	2021	2022	Всего
1. Статьи (в журналах Q1, Q2)	2	30	48	80
2. Диссертации	0	0	7	7
3. Молодые ученые, %	45	45	45	45

#### Результаты за 2020 год

- полученные результаты соответствуют заданию на 2020 год;
- доля молодых ученых (до 39 лет) и аспирантов в общей численности участников проекта составила **63%**, из них 20 аспирантов (всего 156 участн.);
- принято к публикации на 2021 год **5 статей** в журналах:  
Renewable & Sustainable Energy Reviews Q1 (Web of Science) IF=12,11,  
Energy Q1 (Web of Science) IF=6,082,  
International Journal of Hydrogen Energy Q2 (Web of Science) IF=4,939,  
Journal of Engineering Physics and Thermophysics Q1 (Scopus),  
Journal of Engineering Thermophysics Q2 (Scopus) IF=1,163;
- подготовлено еще 10 статей, направленных в журналы Q1 и Q2;
- поданы две заявки на патенты РФ на изобретения;
- начато проведение ежемесячных общих семинаров в рамках КНП.