

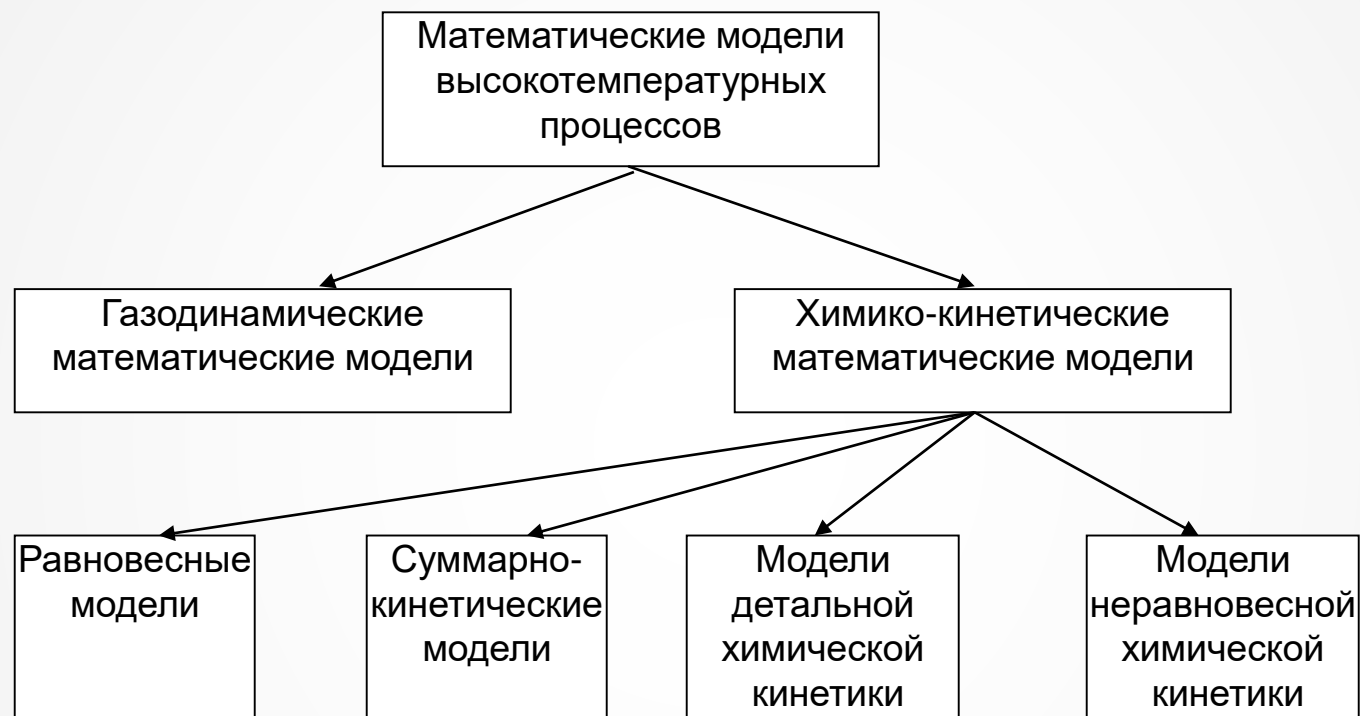


Моделирование рабочих процессов тепловых двигателей, работающих на газомоторном топливе

Абдуллин Айрат Лесталевич –д.т.н., г.н.с, академик АН РТ

2 апреля 2025 г.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССОВ



1 – газодинамическое - многомерность течений с привлечением химической кинетики;

2 - химико-кинетическое - моделирование сложных реагирующих систем в объеме с привлечением уравнений движения;

Система уравнений базовой модели:

$$\frac{d\gamma_i}{d\tau} = -e^{\gamma_i} \sum_j \nu_{ij} \Omega_j + \sum_q \sum_j \nu_{qj} \Omega_j = f(\gamma_i); \quad F_z \equiv 1 - \sum_i e^{-\gamma_i} = 0$$

где $\Omega_j = k_j \left(p / R_0 T \right)^{\bar{m}_j} \exp \left(- \sum_p n_{pj} \gamma_p \right)$

$$F_T \equiv T - T_{on} - \sum_q \left(I_p \mu_q - H_q^{on} \right) r_q / \sum_q C_{pq}^{on} r_q = 0$$

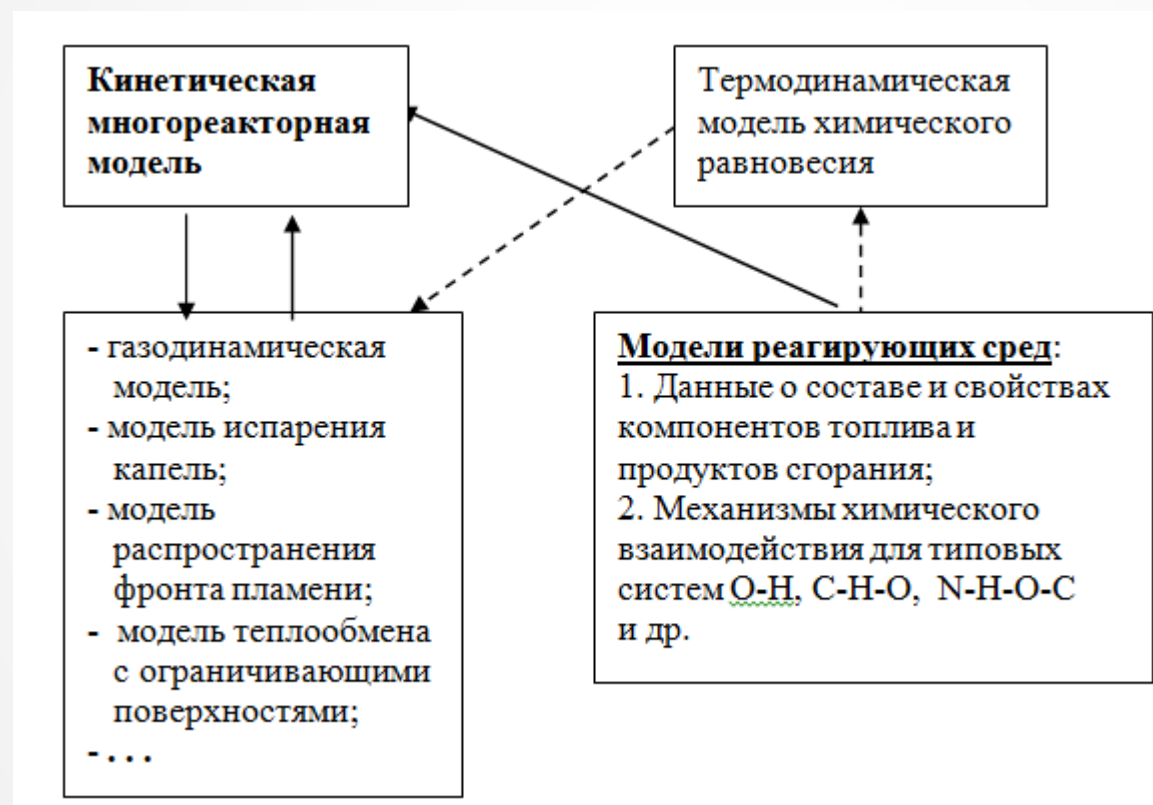
Метод решения:

$$\frac{\gamma_i^{n+1} - \gamma_i^n}{h} = \theta f_i(\gamma_i^n) + (1 - \theta) f_i(\gamma_i^{n+1})$$

$$F_i^{n+1} \equiv \gamma_i^{n+1} - \gamma_i^n - h \left(\theta f_i(< \gamma_k^n >) + (1 - \theta) f_i(< \gamma_k^{n+1} >) \right) = 0$$

$$\left[\frac{\partial F_i}{\partial x_k} \right] [\Delta x_k^{m+1}] = [-F_i^m]$$

Модульный принцип моделирования - базовая модель дополняется частными моделями отдельных физических процессов



$$\frac{dm^+}{d\tau} \Rightarrow \left[\begin{array}{c} V, p, M, i, \\ T, r_i = \\ = f(\tau) \end{array} \right] \Rightarrow \frac{dm^-}{d\tau}$$

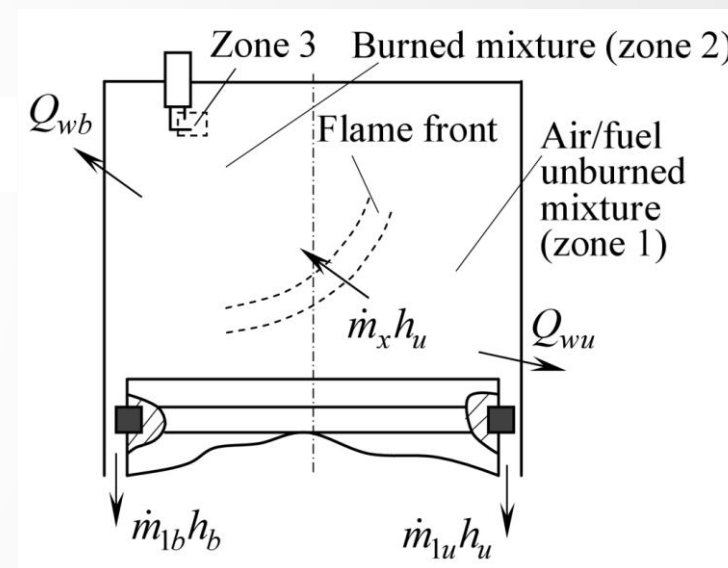
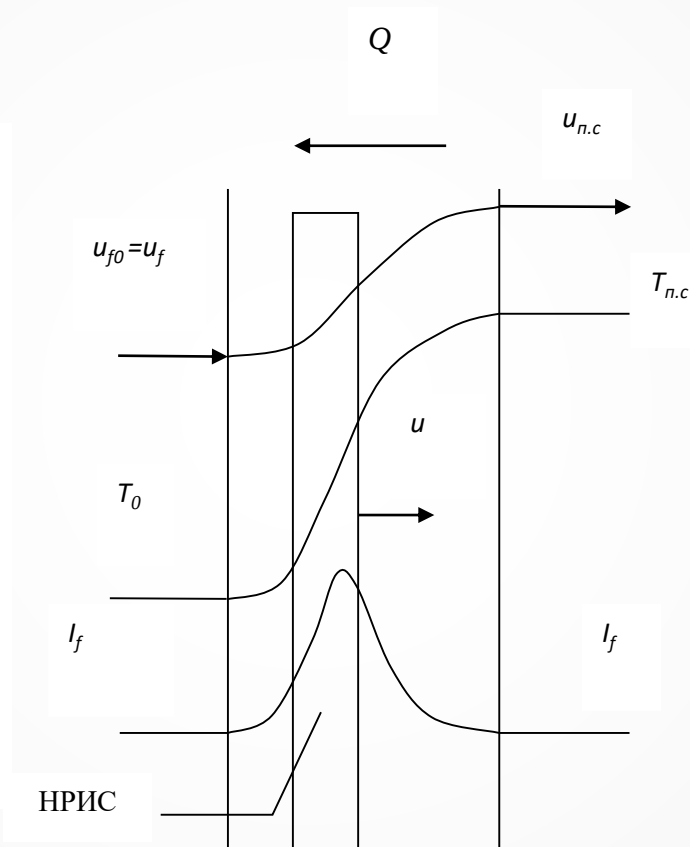
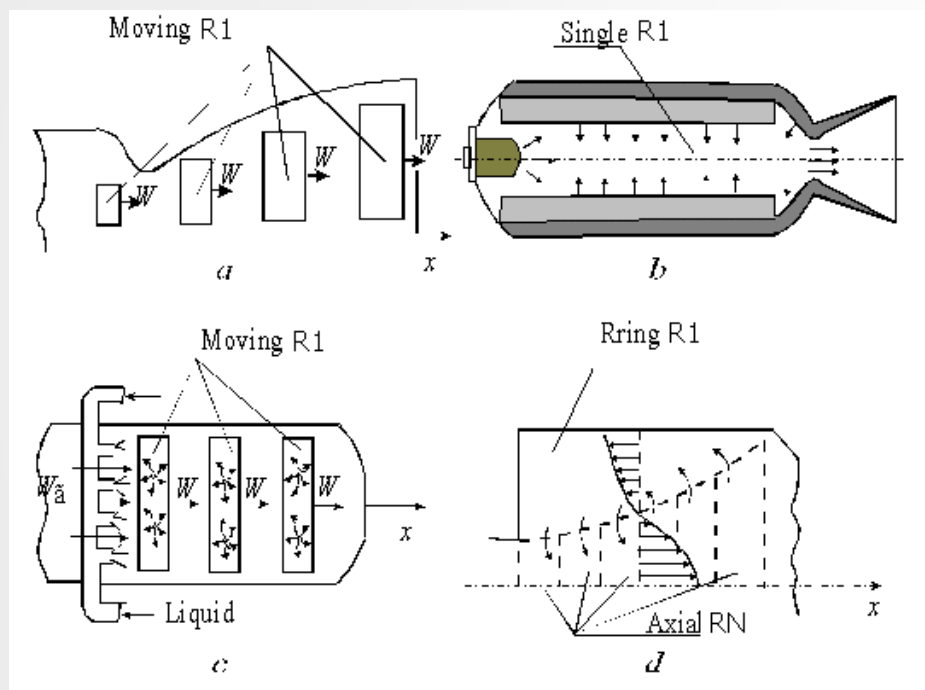
↓↑

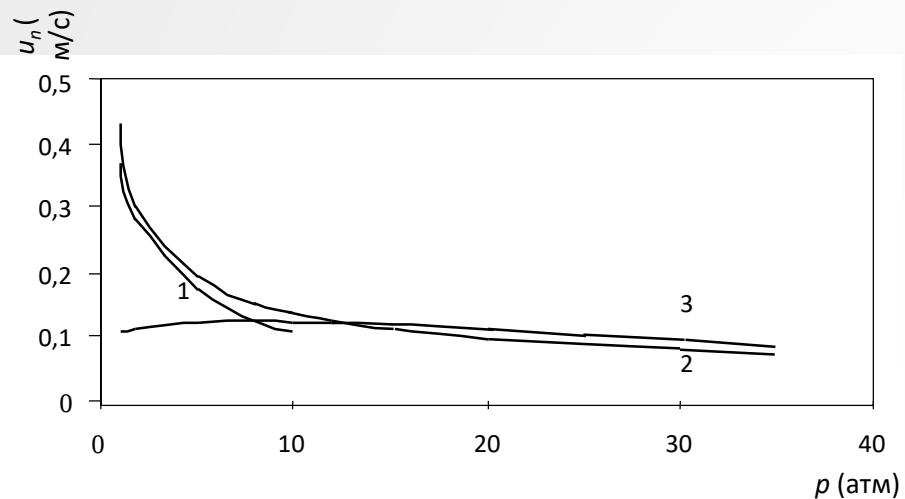
Базовое программное обеспечение позволяет оперативно формировать инвариантные, относительно компонентов рабочих тел и механизмов химических реакций, модели и программы для расчета параметров состояния и состава рабочих тел при различных схемах организации процессов в широких диапазонах изменения температур и давлений.

Разработаны математические модели и программные комплексы для расчета:

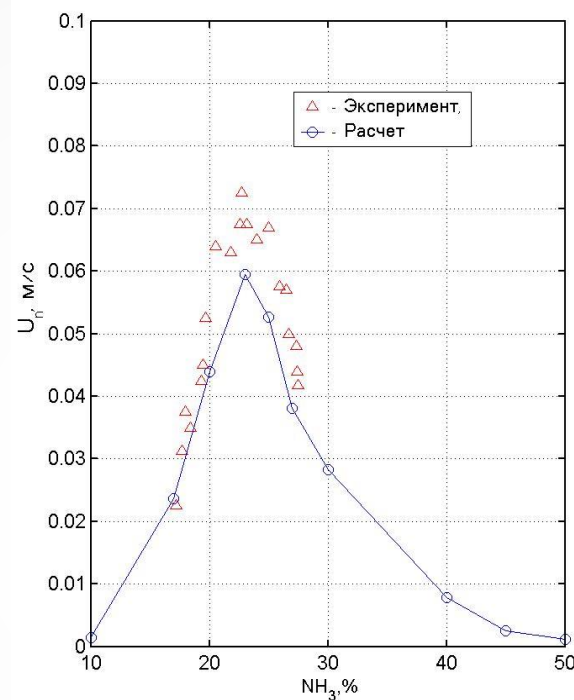
- процессов в проточном реакторе идеального смешения;
- процессов в системе взаимосвязанных реакторов идеального смешения;
- процессов в камере сгорания газогенераторной установки;
- процессов в камере сгорания ГТД;
- процессов горения в цилиндрах ДВС;
- процессов горения в топочном устройстве водогрейного котла при сжигании природного газа или газогенераторных газов (H_2 , CO , CH_4 и др.) и многоступенчатом подводе воздуха;
- процессов во фронте пламени с определением фундаментальной скорости горения.

Примеры использования базовых моделей для расчета реагирующих течений в теплонапряженных агрегатах



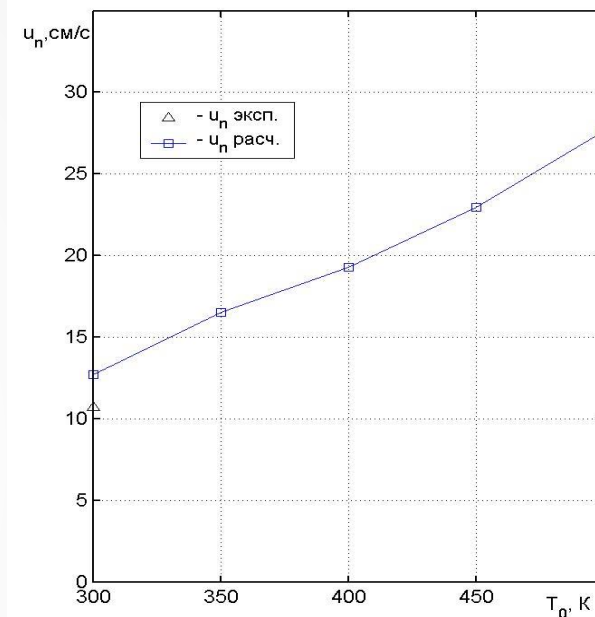


Зависимость нормальной скорости пламени стехиометрической метано-воздушной смеси от давления при $T_f = 300\text{K}$: 1- Andrews, G.E., Bradley D. , 2- Coffee T.P., Kotlar A.J. and Miller M.S. , 3 - "FRONT".



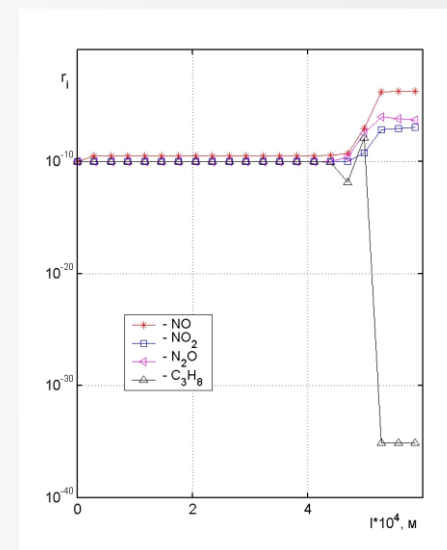
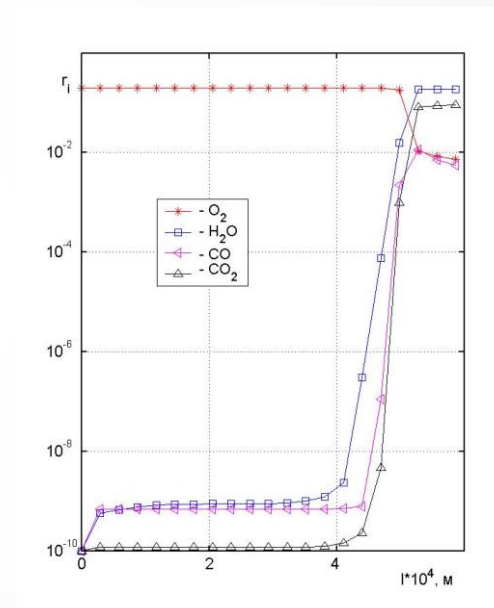
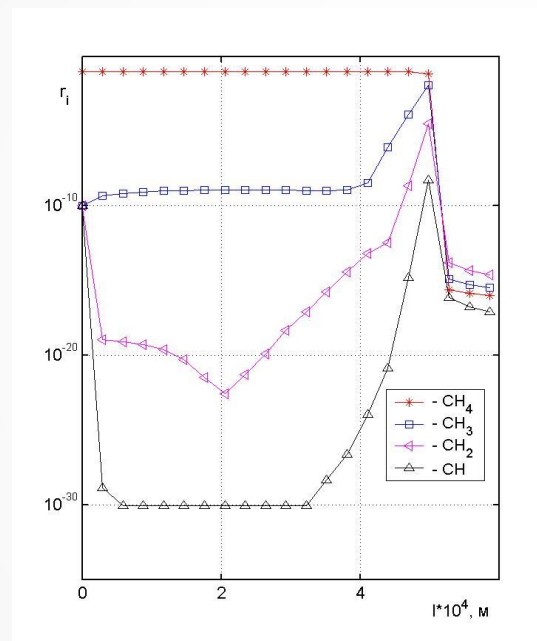
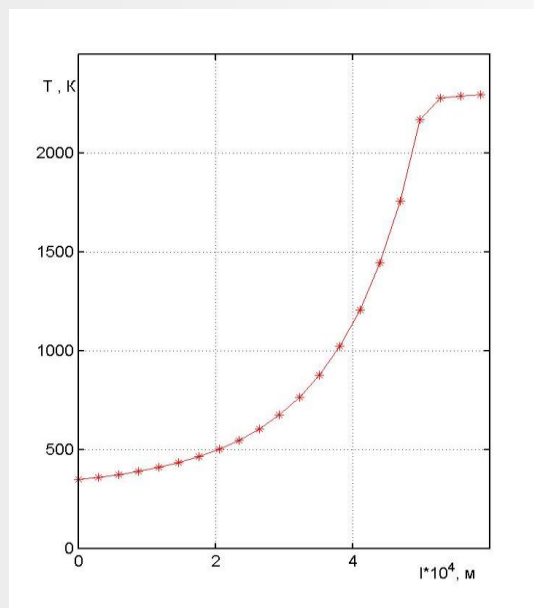
Нормальная скорость пламени в зависимости от содержания NH_3 в воздухе;

Δ —результаты экспериментов В.Ф. Заказнова, Л.А. Куршевой, З.И. Фединой



Зависимость нормальной скорости пламени однородной стехиометрической метано-воздушной смеси от начальной температуры при $P=10$ атм. Здесь: Δ – экспериментальные значения нормальной скорости пламени однородной стехиометрической метано-воздушной смеси, полученные Coffee T.P., Kotlar A.J., Miller M.S, приведенные в [12]; $\square$ – расчетные значения нормальной скорости пламени однородной стехиометрической метано-воздушной смеси

Изменение параметров стехиометрической метано-воздушной смеси в пределах фронта пламени при $p=10$ атм , $T_f=300$ К



Численное исследование параметров фронта пламени смеси $(z \cdot \text{C}_2\text{H}_2 + (1-z) \cdot \text{NH}_3) + \text{воздух}$

Начальные условия : $p = 6 \text{ атм}$, $T_f = 300 \text{ К}$.

Кинетический механизм C-N-H-O:

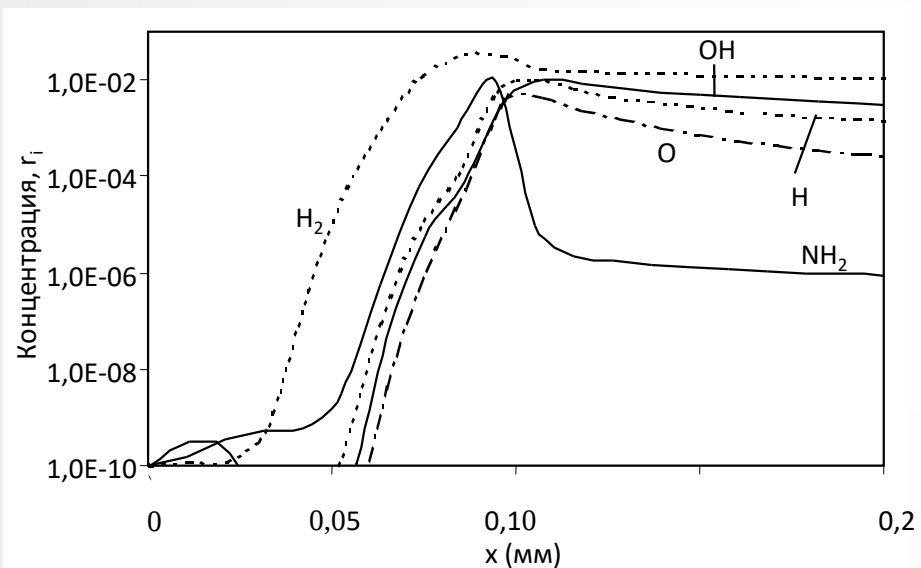
248 элементарных химических реакций.

Набор реагирующих компонентов: N, N₂, NO,

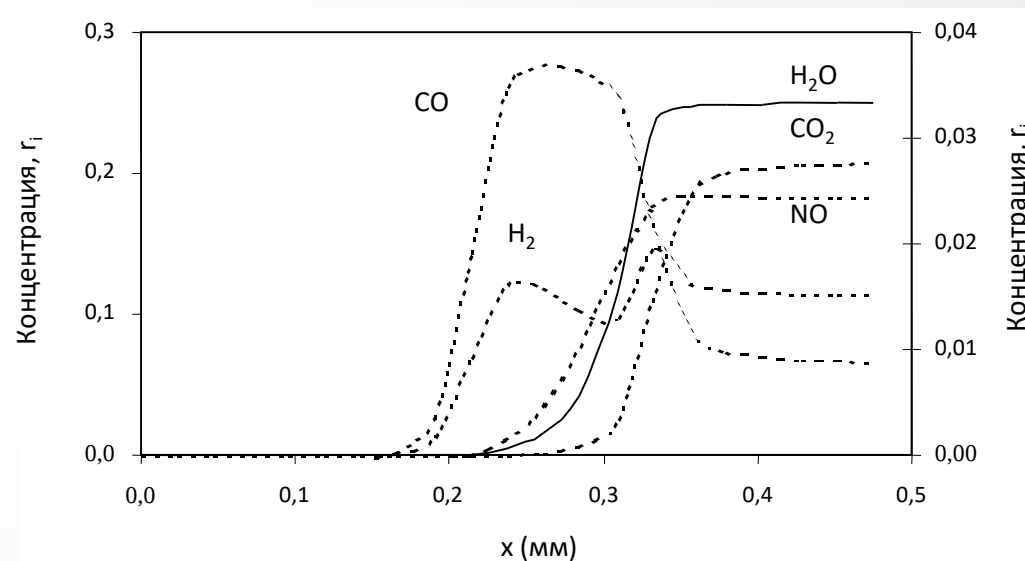
NO₂, NH, NH₂, NH₃, HNO, H₂O₂, N₂O, H, H₂, O, O₂, C, H₂O,

CO, OH, CH₂, CH₃, CH₄, HCO, H₂CO, C₂H, HO₂, C₂H₆,

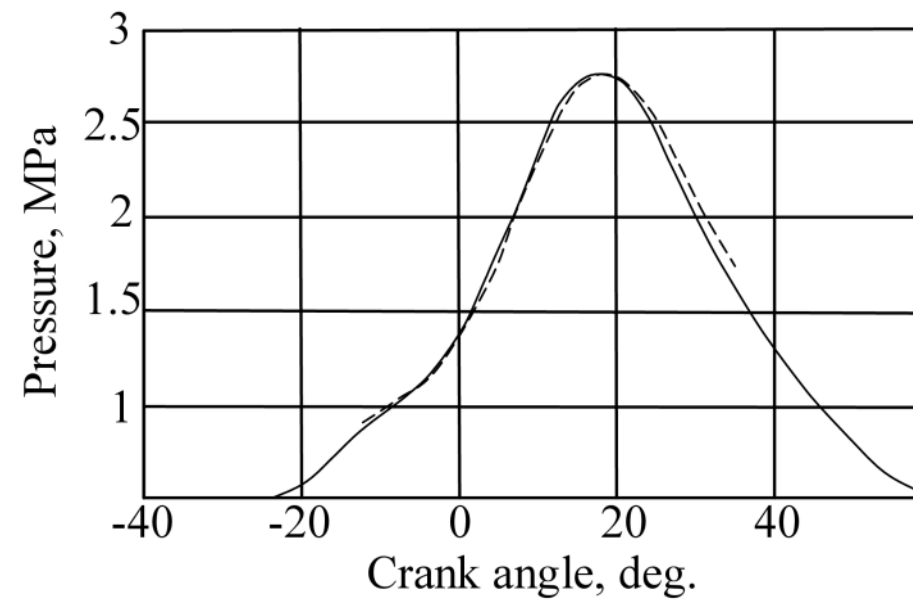
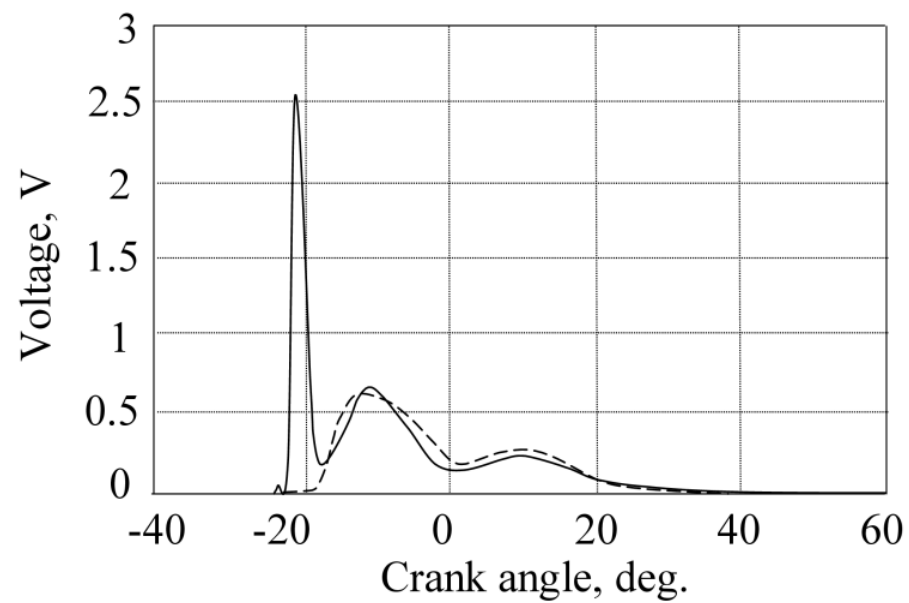
C₂H₅, C₂H₃, C₂H₄, C₂H₂, CO₂.



Фронт пламени стехиометрической смеси
 $(z \cdot \text{C}_2\text{H}_2 + (1-z) \cdot \text{NH}_3) + \text{воздух}$
 $(p = 6 \text{ атм}, T_f = 300 \text{ К}, z = 0,45)$

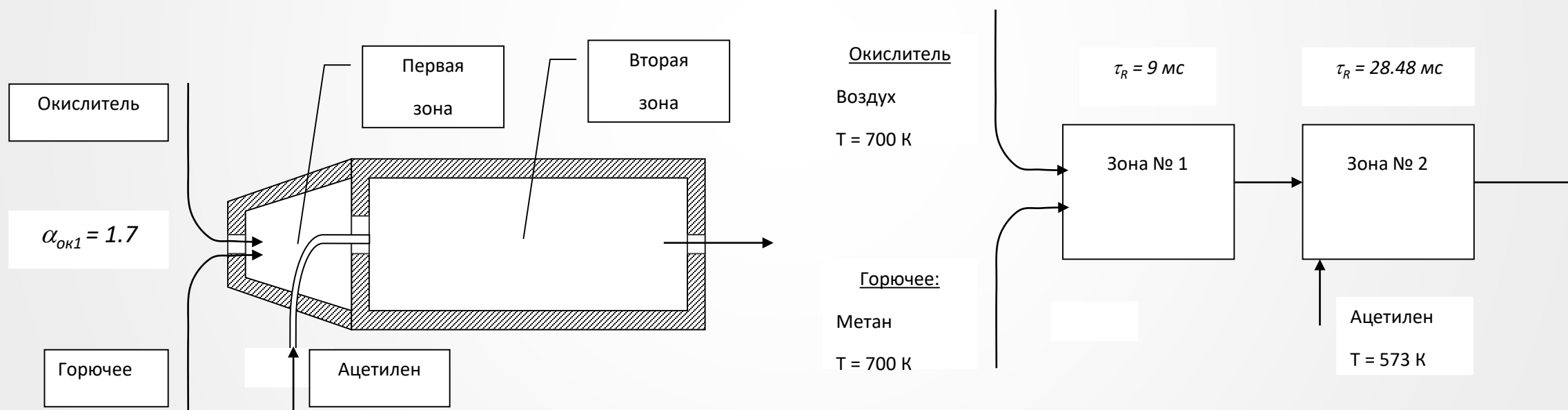


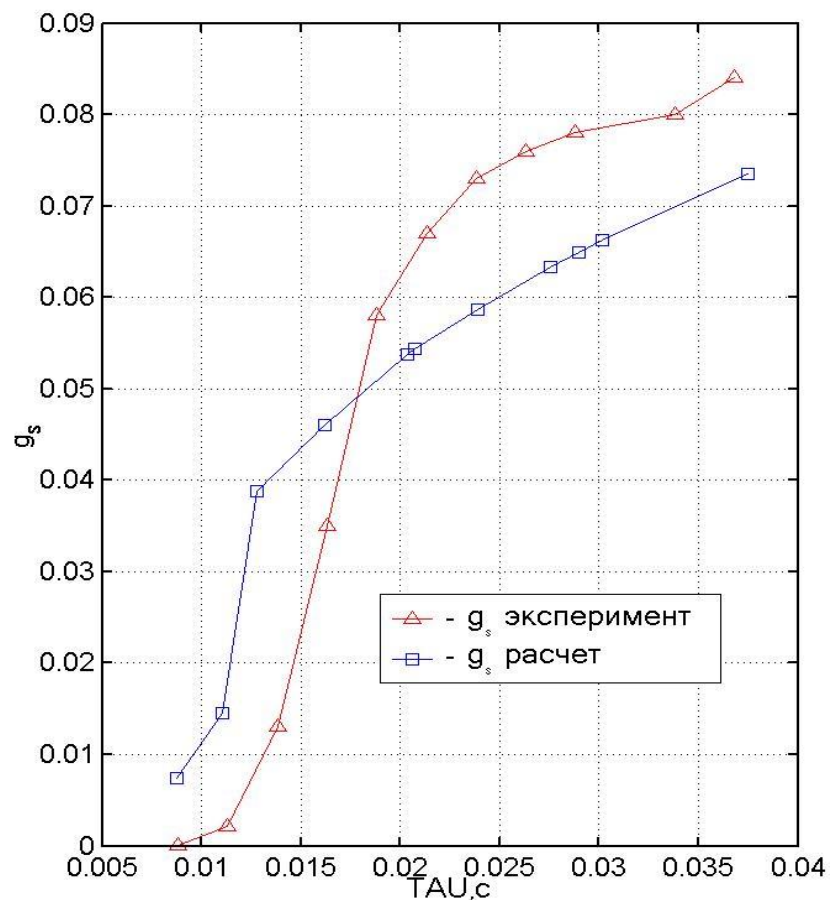
Фронт пламени стехиометрической смеси
 $(z \cdot \text{C}_2\text{H}_2 + (1-z) \cdot \text{NH}_3) + \text{воздух}$
 $(p = 6 \text{ атм}, T_f = 300 \text{ К}, z = 0,1)$



Апробация и исследование режимов сажеобразования при течении метано-кислородной смеси в двухзонном газогенераторе

M. Balthasar, F. Mauss, A. Knobel, M. Kraft Combustion and Flame, 128





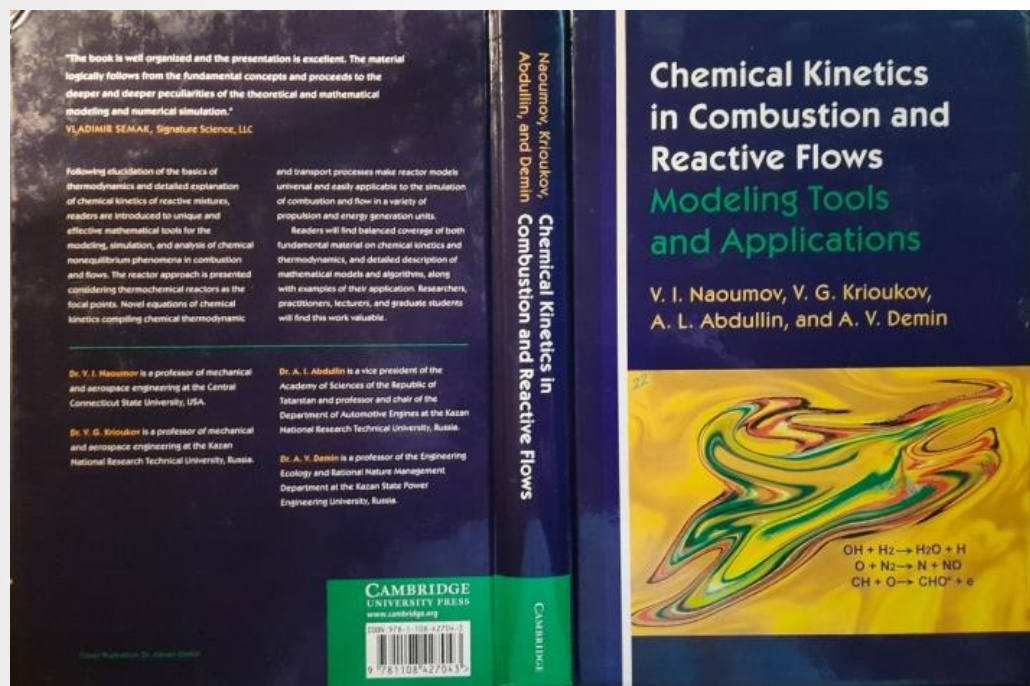
Компоненты реагирующей системы: H, H₂, O, O₂, C, H₂O, CO, CO₂, OH, CH₄, HO₂, CH₂, CH₃, HCO, H₂CO, C₂H, N, N₂, NO, NO₂, C₄H, C₄H₂, C₄H₃, C₂H₆, C₂H₅, C₂H₃, C₂H₄, C₂H₂, HC₄*

C1H4+M=C1H3+H+M
 O2+H2O1=H1O2+O1H1
 O2+C1H4=C1H3+H1O2
 O2+H2=2O1H1
 H2+O1H1=H2O1+H
 O+H2=O1H1+H
 H+O2=O1H1+O
 2O1H1=H2O1+O
 2H+M=H2+M
 2O+M=O2+M
 H+M+O1H1=H2O1+M
 O+H+M=O1H1+M
 C1H4+O=C1H2+H2O1
 O1H1+C1H3=H2O1+C1H2
 C1H3+O=H2C1O1+H
 C1H3+H2C1O1=C1H4+H1C1O1
 C1H3+H1C1O1=C1O1+C1H4
 C1H2+O2=H1C1O1+O1H1
 C1H2+O=H1C1O1+H
 C1H2+H2O1=H2C1O1+H2
 C1H2+H2C1O1=C1H4+C1O1
 H2C1O1+H1C1O1=C1H3+C1O2
 H2C1O1+M=H1C1O1+H+M
 H2C1O1+O2=H1C1O1+H1O2

H2C1O1+O1H1=H1C1O1+H2O1
 H+H2C1O1=H2+H1C1O1
 O+H2C1O1=O1H1+H1C1O1
 M+H1C1O1=C1O1+H+M
 O1H1+H1C1O1=H2O1+C1O1
 H+H1C1O1=H2+C1O1
 O+H1C1O1=O1H1+C1O1
 O2+H1C1O1=C1O1+H1O2
 O2+C2H2=2H1C1O1
 O+C2H2=C1H2+C1O1
 O2+C2H1=H1C1O1+C1O1
 C1O1+O1H1=C1O2+H
 C1O1+O+M=C1O2+M
 C1H4+O=C1H3+O1H1
 O1H1+C1H4=H2O1+C1H3
 C1H2+C1H4=2C1H3
 C1H3+M=C1H2+H+M
 H+C1H3=H2+C1H2
 C1H2+C1H3=C2H4+H
 C1H2+C1H2=C2H2+H2
 C1H3+C1H3=C2H6
 C1H3+C1H3=H2+C2H4
 H+C2H6=H2+C2H5
 O+C2H6=C2H5+O1H1

C2H6+O1H1=C2H5+H2O1
 C1H3+C2H6=C1H4+C2H5
 C2H5+M=H+C2H4+M
 C2H5+O2=H1O2+C2H4
 C2H5+H=C2H4+H2
 C2H4+M=H2+C2H2+M
 C2H4+M=H+C2H3+M
 C2H4+H=H2+C2H3
 C2H4+O=C1H3+H1C1O1
 C2H4+O1H1=C1H3+H2C1O1
 C2H3+M=H+C2H2+M
 C2H3+H=H2+C2H2
 C2H2+M=H+C2H1+M
 C2H2+H=H2+C2H1
 C2H2+O=C1H2+C1O1
 C2H2+C2H2=H+C4H3
 C2H2+C2H1=H+C4H2
 C2H2+H=C2H3
 H2+C2H1=H+C2H2
 C4H3+M=H+C4H2+M
 C4H2+M=C4H1+H+M
 C4H2+H=C4H1+H2
 2C4H2=H1C4*+H1C4*+H2
 C4H2+M=H1C4*+H+M
 C4H1=H1C4*

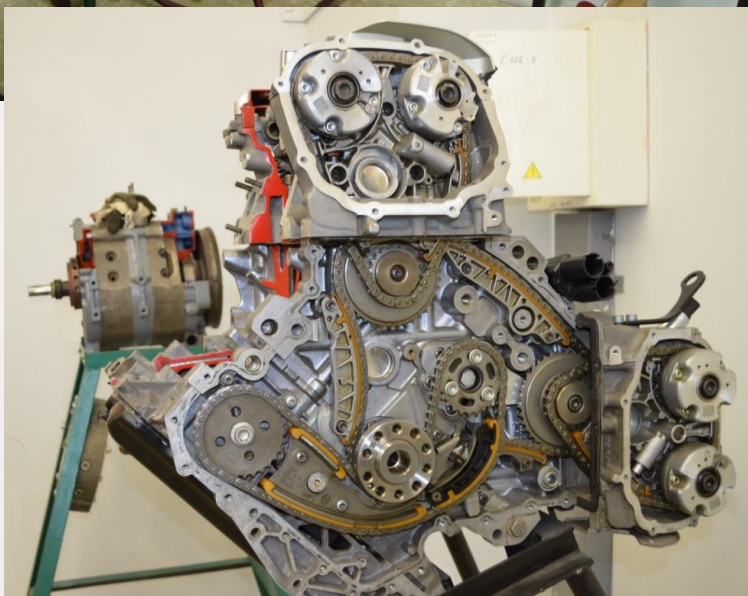
Опыт многолетней работы по моделированию рабочих процессов в теплонапряженных агрегатах энергетических установок обобщен и опубликован в коллективной монографии “Chemical Kinetics in Combustion and Reactive Flows: Modeling Tools and Applications”, изданной в Cambridge University Press.

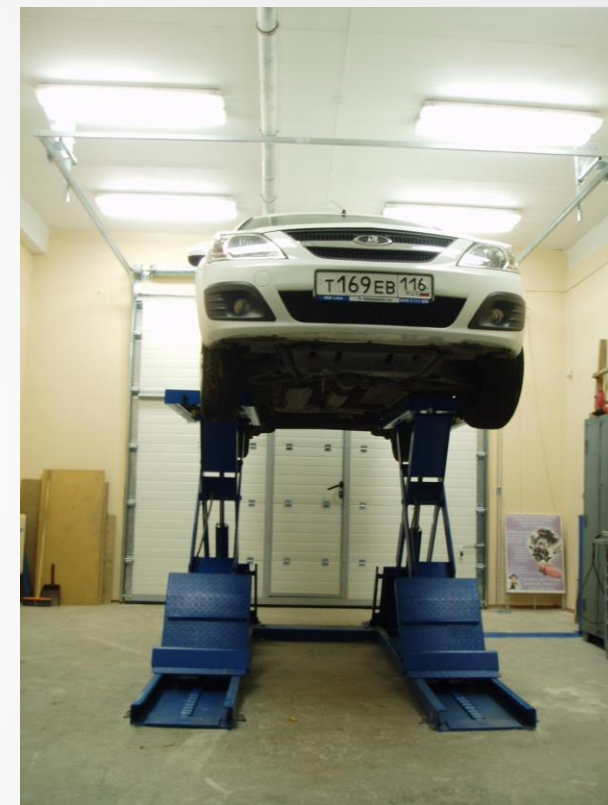
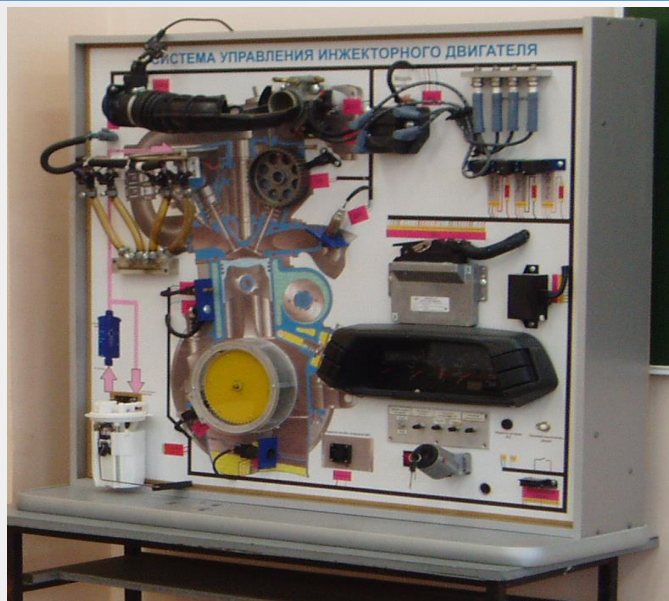


Кафедра АДиС является выпускающей по следующим направлениям подготовки:

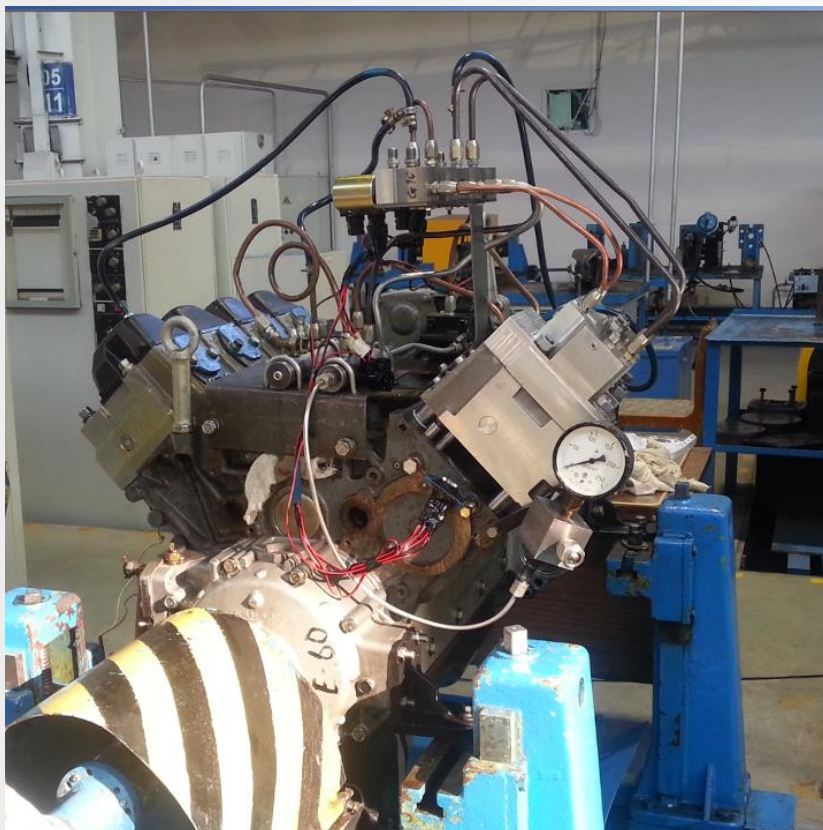
1. Направление подготовки 13.03.03 «Энергетическое машиностроение», профиль «Двигатели внутреннего сгорания».
2. Направление подготовки 23.03.03. «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», профили: «Фирменный автомобильный сервис» и «Инжиниринг и эксплуатация автомобилей и транспортных комплексов».
3. Направление подготовки 23.04.02. «Наземные транспортно-технологические комплексы», магистерская программа «Проектирование автомобилей и их систем».











По мегагранту № 9932/17/07-K-12 «Создание семейства двигателей КАМАЗ на альтернативных видах топлива с диапазоном мощностей 300...400 л.с. и потенциалом выполнения перспективных экологических требований» коллектив кафедры разработал опытный образец электронноуправляемого гидроприводного газораспределительного механизма. По теме существует задел в виде 18 статей, 4 патентов, 1 программы для ЭВМ

Альтернативный привод позволяет:

1. управлять углом опережения открытия и запаздывания закрытия клапанов ГРМ;
2. отключать цилиндры ДВС путем закрытия клапанов в них;
3. реализовывать экологичный рабочий режим;
4. обеспечивать высокий тормозной момент при торможении автомобиля двигателем.

Одним из направлений деятельности кафедры является модернизация перспективных и **высокоэффективных схем гасителей крутильных колебаний коленчатого вала двигателей**, подтвержденных патентами на изобретения и полезные модели №2297562 Демпфер, №2405991 Демпфер, №2472990 Динамический гаситель крутильных колебаний, № 169638 Упруго-вязкий гаситель крутильных колебаний, №2626799 Гаситель крутильных колебаний, №189356 Гаситель крутильных колебаний, №2692738 Адаптивный гаситель крутильных колебаний, №184758 Адаптивный гаситель крутильных колебаний, № 193627 Маховик переменного момента инерции и №2706131 Гаситель крутильных колебаний. Патенты на конструкцию стенда по испытанию предложенных гасителей: № 2712937 и №190703 Стенд для испытания гасителей крутильных колебаний позволяют снизить срок разработки и доводки современных конструкций гасителей крутильных колебаний.

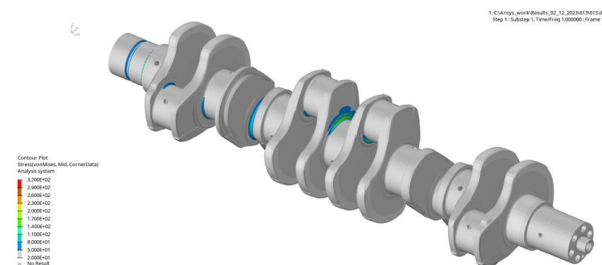
Предложения:

1. Расчет на крутильные колебания коленчатого вала двигателя с учетом присоединенных элементов (линейная и разветвленная схема) с возможностью оценки эффективности работы гасителей крутильных колебаний.
2. Разработка опытной конструкции универсального стенда по испытанию и доводке гасителей крутильных колебаний коленчатых валов для высокофорсированных двигателей, которая позволит существенно сократить время доводки высокоэффективных гасителей крутильных колебаний.





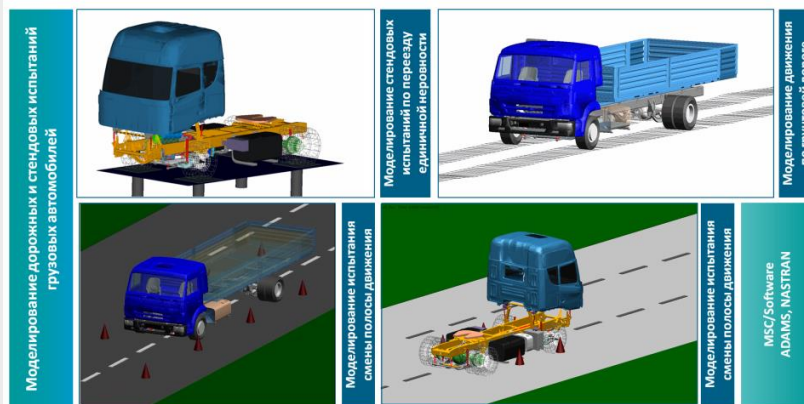
Анализ НДС коленчатого вала



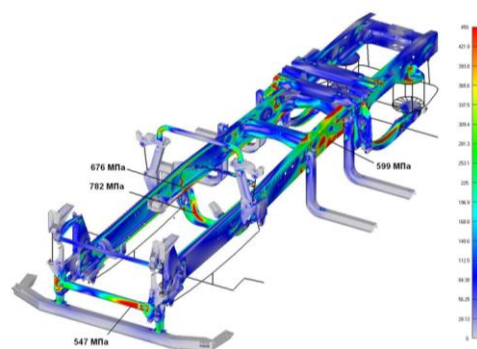
Учет зон закалки, прессовых посадок, контактных взаимодействий



Моделирование задач устойчивости, управляемости и плавности хода



Определение напряженно-деформированного состояния несущей системы автомобиля





СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

2 апреля 2025 г.