

От редактора

Данный сборник включает 36 оригинальных статей, обобщающих результаты работ, проводимых сотрудниками ЦИАМ за последние 5 лет по различным аспектам кинетики физико-химических процессов в реагирующих потоках и в плазме, а также по современным проблемам физики горения и взрыва. В ЦИАМ эти работы сконцентрированы в отделении 600 и в Научно-образовательном Центре «Кинетика физико-химических процессов и горение», который был создан в 2009 г. на базе отделения 600. Задачами отделения 600 являются проведение фундаментальных и прикладных исследований по различным разделам физики неравновесных процессов и физико-химической кинетики с целью создания опережающего научно-технического задела для разработки нового поколения двигателей для аэрокосмических систем различного назначения и наземных энергетических установок с пониженным уровнем эмиссии загрязняющих атмосферу соединений.

Книга состоит из 7 разделов:

Раздел 1 Кинетические модели горения углеводородных и синтетических топлив в воздухе.

Раздел 2 Термически неравновесные процессы за ударными волнами и при горении.

Раздел 3 Неравновесные процессы в кластерной и аэрозольной плазме, образующейся в камерах сгорания и выхлопных струях реактивных двигателей.

Раздел 4 Интенсификация горения газовых смесей при возбуждении реагирующих молекул электрическим разрядом.

Раздел 5 Горение, инициированное лазерным излучением.

Раздел 6 Математическое моделирование процессов горения в камерах сгорания перспективных реактивных двигателей.

Раздел 7 Образование экологически опасных компонентов в камерах сгорания и в струях реактивных двигателей.

В разделе 1 рассмотрены особенности построения детальных реакционных механизмов процессов окисления и пиролиза органических (предельные и непредельные углеводороды, авиационные керосины), неорганических (водород, синтез-газ) и металлизированных топлив в воздухе.

В первой статье *Старик А. М., Титова Н. С. и Шарипов А. С.* представили реакционный механизм, предназначенный для описания воспламенения и горения смесей водород/воздух и синтез-газ/воздух. Для верификации кинетической модели использовался обширный набор экспериментальных данных по временам задержки воспламенения, скорости распространения ламинарного пламени и временной эволюции концентраций основных компонентов, полученных в ударных трубах и в проточном реакторе. Показано, что разработанная авторами кинетическая модель позволяет получить заметно лучшее, чем современные реакционные механизмы, разработанные другими авторами, соответствие измеренным значениям времени задержки воспламенения.

Кулешов П. С., Старик А. М. и Титова Н. С. разработали детальную кинетическую модель воспламенения и горения метана и пропана, а также различных смесей на их основе в кислороде (воздухе). Модель включает как высокотемпературный, так и низкотемпературный механизмы окисления и содержит 599 обратимых реакций с участием 92 компонентов. Преимущества модели данной работы особенно заметны при описании низкотемпературного окисления пропана в проточном реакторе, где созданные к настоящему времени реакционные механизмы даже качественно не описывают экспериментальные данные. Еще одним достоинством разработанной кинетической модели является ее способность правильно предсказывать такие интегральные характеристики, как время задержки воспламенения и скорость распространения ламинарного пламени для смесей углеводородов $\text{C}_1\text{H}_4\text{--C}_2\text{H}_6\text{--C}_3\text{H}_8$ с добавкой водорода.

В работе *Титовой Н. С., Торохова С. А. и Старика А. М.* представлена укрупненная кинетическая модель для описания окисления и пиролиза *n*-декана и *n*-додекана, включающая как высоко-, так и низкотемпературный механизмы развития цепного процесса. Модель позволяет с более высокой точностью, чем существующие в настоя-

щее время модели, описать экспериментальные данные по задержкам воспламенения в смесях $n\text{-C}_{10}\text{H}_{22}/\text{O}_2$ (воздух) и $n\text{-C}_{12}\text{H}_{26}/\text{воздух}$ как при высоких ($T_0 = 1000\text{--}1800\text{ K}$), так и при низких ($T_0 = 650\text{--}1000\text{ K}$) температурах в широком диапазоне начальных давлений ($P_0 = 1,2\text{--}80\text{ атм}$) и эквивалентного отношения топливо/окислитель ($\phi = 0,5\text{--}3$). На основе этой модели проведен анализ особенностей низкотемпературного воспламенения n -декана в воздухе. Подробно рассмотрены механизмы, ответственные за возникновение «холодно-пламенных явлений» при окислении тяжелых углеводородов.

В следующей статье *Титова Н. С., Торохов С. А. и Старик А. М.* представили детальную кинетическую модель для описания воспламенения и горения суррогатных смесей, представляющих авиационные керосины. Кинетическая модель для такой смеси объединяет реакционные механизмы для окисления n -декана и бензола. Эта модель позволяет описывать с удовлетворительной точностью экспериментальные данные по времени задержки воспламенения топлива Jet-A в достаточно широком диапазоне начальных температур $T_0 = 715\text{--}1750\text{ K}$ и коэффициента избытка топлива $\phi = 0,5\text{--}2$. Созданный реакционный механизм существенно лучше описывает экспериментальные данные, чем механизмы других авторов.

В статье *Старика А. М., Титовой Н. С. и Шарипова А. С.* проведен теоретический анализ кинетических процессов при воспламенении комбинированного топлива, состоящего из метана и наночастиц Al. На основе *ab initio* расчетов определены возможные каналы химических реакций с участием Al-содержащих компонентов и углеводородных радикалов и рассчитаны их константы скорости. Построена кинетическая модель воспламенения и горения такого комбинированного топлива. Показано, что введение небольшого ($\sim 5\%$ по массе) количества Al в метанокислородную смесь позволяет значительно сократить время задержки воспламенения, а также уменьшить температуру воспламенения.

В следующей статье *Старик А. М., Титова Н. С. и Шарипов А. С.* провели сравнительный анализ предсказательной способности двух подходов к оценке констант скорости реакций с участием электронно-возбужденных молекул кислорода. Первый подход предполагает детальное *ab initio* исследование возбужденных поверхностей потен-

пиальной энергии. Второй подход представляет собой модификацию метода вибронных термов и позволяет легко оценивать активационные барьеры реакций с участием электронно-возбужденных молекул без привлечения квантово-химических расчетов.

В работе *Старика А. М. и Шарипова А. С.* рассмотрены возможности применения расчетных методов квантовой химии к анализу процессов окисления углеводородов синглетным кислородом. Проведен *ab initio* расчет поверхностей потенциальной энергии реакции молекулы CH_4 с молекулярным кислородом в состояниях $\text{O}_2(X^3\Sigma_g^-)$, $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$ и $\text{O}_2(b^1\Sigma_g^+)$. Для соответствующих процессов на основе теории активированного комплекса получены аппроксимации констант скорости.

В разделе 2 анализируются особенности описания термически неравновесных процессов в различных реагирующих молекулярных системах за ударными волнами.

Луховицкий Б. И. и Старик А. М. рассмотрели взаимное влияние электронно-колебательного обмена и химических процессов в приближении урвневой и модовой кинетики на динамику установления термодинамического равновесия в потоке молекулярного кислорода за фронтом ударных волн различной интенсивности. Показано, что для правильного описания поведения концентраций компонентов смеси необходимо использовать урвневую модель колебательной кинетики как для молекул O_2 в основном электронном состоянии, так и в электронных состояниях $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$ и $\text{O}_2(b^1\Sigma_g^+)$.

В статье *Арсентьева И. В., Луховицкого Б. И. и Старика А. М.* построена модель, позволяющая рассчитывать константы скоростей реакций разных типов и изменение колебательной энергии компонентов в этих реакциях в термически неравновесных условиях. Модель основана на простых физических принципах, не содержит полуэмпирических параметров и применима, в отличие от других моделей, в случаях, когда реагенты и продукты реакций содержат несколько колебательных мод. Проводится сравнение расчетов фактора неравновесности и энергии, выделяющейся в колебательные степени свободы продуктов химической реакции, по предложенной модели и по другим известным моделям.

Арсентьев И. В., Старик А. М. и Титова Н. С. на основе расширенной термически неравновесной кинетической модели, включающей реакции с электронно-возбужденными атомами и молекулами и учитывающей колебательно-электронно-химическое взаимодействие, провели детальный анализ образования нейтральных и заряженных частиц в молекулярной системе N_2-O_2-Ar за сильными ударными волнами. Показано, что модель, не учитывающая эти процессы, значительно завышает концентрации и заряженных, и нейтральных частиц и не позволяет правильно предсказать длину релаксационной зоны.

В работе *Арсентьева И. В., Лосева С. А., Луховицкого Б. И. и Старика А. М.* представлена термически неравновесная кинетическая модель, описывающая плазмохимические процессы в смеси CO_2-N_2 за сильными ударными волнами, и рассмотрено взаимное влияние химических процессов, неравновесного возбуждения молекулярных колебаний и электронных состояний атомов и молекул, а также их взаимодействие с электронным газом. Проведен анализ процессов, происходящих в релаксационной зоне за ударной волной в смеси $CO_2/N_2 = 97/3$, моделирующей атмосферу Марса.

Луховицкий Б. И., Титова Н. С., Старик А. М. и Шарипов А. С. рассмотрели влияние неравновесного возбуждения молекулярных колебаний реагирующих молекул на воспламенение водородно-кислородной смеси, метановоздушной смеси и смеси синтез-газа с воздухом за фронтом наклонной ударной волны и показали, что использование для анализа процесса воспламенения термически равновесных моделей химической кинетики может привести к значительным погрешностям при определении длины зоны индукции и конечного давления в продуктах сгорания.

Раздел 3 посвящен анализу механизмов формирования ионов, заряженных кластеров и наночастиц в кластерной и аэрозольной плазме, которая образуется при горении углеводородных и металлизированных топлив, в струях реактивных двигателей и в атмосфере.

В работе *Старика А. М., Савельева А. М., Титовой Н. С. и Рейн О. Э.* исследуются процессы формирования заряженных газовых компонентов, кластеров и сажевых частиц в углеводородно-воздушных пламенах. Показано, что формирование полидисперсного ансам-

бля положительно и отрицательно заряженных частиц происходит из-за прилипания ионов к первичным и вторично сформированным частицам, а также коагуляции заряженных и нейтральных частиц.

Савельев А. М. и Старик А. М. представили краткий анализ классических и кинетических моделей ионно-индуцированной нуклеации. Для бинарной $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{SO}_4$ системы на основе последовательного кинетического подхода проведены расчеты нестационарной кластеризации при наличии в системе ионов HSO_4^- . Показано, что только на достаточно больших временах в рассматриваемой системе формируется стационарное распределение мелких кластеров с числом молекул H_2SO_4 $s = 1-6$, и только в этом случае справедливо использование классической теории ионно-индуцированной нуклеации.

В другой работе *Савельева А. М. и Старика А. М.* рассматривается влияние различных типов взаимодействия между частицами нанометрового размера: Ван-дер-Ваальсовского, кулоновского и поляризационного — на скорость их коагуляции в зависимости от величины и знака заряда на частицах, а также влияния Ван-дер-Ваальсовских сил на скорость прилипания молекул к нейтральным кластерам в аэродисперсных плазменных системах. Показано, что действие Ван-дер-Ваальсовских и поляризационных сил существенно увеличивает скорость коагуляции нейтральной и заряженной частиц, а Ван-дер-Ваальсовское взаимодействие между нейтральным кластером и молекулой в 2–2,5 раза усиливает скорость осаждения молекул.

В следующей статье *Савельев А. М. и Старик А. М.* рассмотрели особенности образования пылевой плазмы за фронтом ударной волны, распространяющейся в мезосфере Земли. Показано, что наличие в мезосфере частиц двух типов (проводящих Fe_2O_3 и диэлектрических SiO_2) приводит к образованию за фронтом ударной волны как положительно, так и отрицательно заряженных частиц. При не очень высоких температурах за фронтом их зарядка происходит только в результате термоэлектронной эмиссии, а при более высоких температурах значительную роль играют хемо-ионизационные реакции, в результате которых образуется большое количество ионов и электронов.

Старик А. М., Титова Н. С., Секундов А. Н. и Щепин С. А. численно исследовали особенности формирования ионов и электронов при

горении различных углеводородных топлив в пламени и в камере сгорания авиационного двигателя. Получено качественное соответствие рассчитанных значений концентраций положительных и отрицательных ионов экспериментальным данным. Показано, что в камере сгорания реактивного двигателя, работающей в диффузионном режиме, наибольшая концентрация в богатой зоне камеры сгорания достигается для ионов $C_2H_3O^+$ и электронов и составляет 10^{11} – 10^{12} см $^{-3}$, а в выходном сечении доминирующими являются ионы NO^+ , NO_3^- , $C_3H_7O^+$, SO_3^- и HSO_4^- , но их концентрация не превышает $2 \cdot 10^8$ см $^{-3}$.

В последней статье этого раздела *Савельев А. М. и Старик А. М.* на основе траекторных расчетов проанализировали особенности взаимодействия дипольных двухатомных молекул с заряженной частицей нанометрового размера. Установлено, что традиционный подход к описанию прилипания полярной молекулы к заряженной частице, основанный на использовании осредненного потенциала взаимодействия, полученного в предположении равновесного распределения ориентации дипольного момента молекулы в поле точечного заряда и центрально симметричного характера взаимодействия полярной молекулы и частицы, не позволяет правильно выявить важные особенности такого взаимодействия.

В разделе 4 рассматриваются фундаментальные и прикладные аспекты проблемы интенсификации цепных реакций в реагирующих смесях при помощи электрического разряда.

Плевако Ф. В., Жданок С. А., Чернухо А. П., Наумов В. В. и Старик А. М. исследовали потенциальные возможности комбинированного скрещенного разряда, состоящего из высоковольтного импульсного барьерного разряда и поддерживающего разряда постоянного тока, генерировать электронно-возбужденные молекулы синглетного кислорода $O_2(a^1\Delta_g)$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ в бинарной смеси O_2/He при непрерывном режиме работы при субатмосферном давлении. Установлено, что выход синглетного кислорода увеличивается с увеличением мощности разряда постоянного тока и меняется в зависимости от процентного содержания кислорода в смеси O_2/He в диапазоне 1%–5%.

Смирнов В. В., Старик А. М., Стельмах О. М., Титова Н. С. и Чернухо А. П. представили результаты расчетно-экспериментального

исследования влияния молекул кислорода, возбужденных в синглетное электронное состояние $a^1\Delta_g$ в электрическом разряде, на сокращение длины зоны индукции при горении смеси H_2-O_2 в дозвуковом потоке при низком давлении. Показано, что даже при небольшой концентрации молекул $O_2(a^1\Delta_g)$ в молекулярном кислороде ($\sim 3,9\%$) воспламенение водородно-кислородной смеси становится возможным при температуре газа ниже порога самовоспламенения и при этом также удается втрое сократить длину задержки воспламенения по сравнению со случаем отсутствия молекул $O_2(a^1\Delta_g)$ в смеси.

Старик А. М., Лутовицкий Б. И., Титова Н. С. и Чернухо А. П. на основе численного моделирования провели анализ механизмов, ответственных за интенсификацию воспламенения смесей H_2-O_2 и CH_4-O_2 при активации молекулярного кислорода электрическими разрядами с различными значениями приведенной напряженности электрического поля. Расчеты показали, что наличие колебательно- и электронно-возбужденных молекул O_2 , а также атомов O в кислородной плазме позволяет интенсифицировать цепной механизм воспламенения даже при небольших значениях вложенной в газ энергии электрического разряда, а величина задержки воспламенения существенно зависит от типа используемого разряда.

В статье *Старика А. М., Козлова В. Е. и Титовой Н. С.* анализируется возможность увеличения скорости распространения ламинарного пламени в смесях H_2 -воздух и CH_4 -воздух при возбуждении молекул O_2 в синглетное состояние $a^1\Delta_g$. Показано, что наличие в исходной смеси даже 10% молекул $O_2(a^1\Delta_g)$ по отношению к обычному кислороду приводит к заметному (до 70%) ускорению горения. Изменяя концентрацию $O_2(a^1\Delta_g)$ в исходной смеси, т. е. изменяя степень возбуждения, можно сохранять скорость распространения пламени постоянной при изменяющихся параметрах смеси (давлении и температуре).

В работе *Старика А. М., Шарипова А. С. и Титовой Н. С.* проведено исследование механизмов интенсификации горения смеси синтез-газ/воздух в сверхзвуковом потоке за наклонной ударной волной при предварительном возбуждении колебаний молекул реагентов. Данный эффект обусловлен интенсификацией цепных реакций, главным образом, из-за увеличения констант скорости реакций с участием ко-

лебательно-возбужденных молекул, и появлением новых каналов развития цепного механизма. Возбуждение колебаний реагирующих молекул H_2 , CO и N_2 намного более эффективно в смысле сокращения длины зоны индукции, чем простой нагрев смеси при одинаковом количестве подведенной энергии. Иницирование горения при низкой температуре за фронтом ударной волны в случае возбуждения колебаний молекул H_2 , N_2 и CO дает возможность более эффективного преобразования химической энергии реагентов в тепловую энергию по сравнению с обычным методом иницирования горения путем нагрева смеси.

Раздел 5 посвящен комплексному анализу механизмов иницирования горения лазерным излучением.

В работе *Старика А. М. и Лутовицкого Б. И.* проводится сравнительный анализ различных методов лазерно-индуцированного иницирования горения, включая метод локального нагрева среды лазерным излучением, фотохимический метод, в основе которого лежит диссоциация исходных компонентов, метода лазерной искры и метода, основанного на возбуждении внутренних степеней свободы реагирующих молекул лазерным излучением. Дано сравнение эффективности возбуждения колебательных, электронных и электронно-колебательных состояний некоторых молекул и влияния данного возбуждения на скорости цепных реакций с их участием в водородно- и углеводородно-воздушных смесях.

Лутовицкий Б. И., Старик А. М. и Титова Н. С. проанализировали возможность интенсификации воспламенения и горения смесей $H_2(CH_4, C_2H_2)-O_2$ (воздух) с добавками H_2O либо O_3 при возбуждении асимметричных колебаний молекул воды или озона резонансным лазерным излучением. Показано, что возбуждение колебаний молекул H_2O или O_3 при их добавлении как в относительно легко воспламеняемые водородно-воздушные смеси, так и в тяжело воспламеняемые углеводородно-воздушные смеси позволяет существенно снизить температуру воспламенения и время индукции в достаточно широком диапазоне начальных параметров газа.

Старик А. М. и Шарипов А. С. провели анализ влияния возбуждения молекулярных колебаний CO резонансным лазерным излучением

с длиной волны 4,677 мкм на кинетику инициирования горения синтез-газа в воздухе. Показано, что возбуждение колебаний молекул СО лазерным излучением приводит к ускорению цепных реакций в смеси синтез-газ/воздух и, как следствие, к значительному (в 10–100 раз) сокращению времени индукции, а также к значительному снижению температуры воспламенения даже при небольшой величине энергии излучения, подведенной к газу ($E_s = 0,4$ эВ/(мол СО)).

В работе *Кулешова П. С., Старика А. М. и Титовой Н. С.* рассмотрены кинетические механизмы, ответственные за интенсификацию цепных реакций в гомогенных водородно-воздушных и метановоздушных смесях при фотодиссоциации молекул O_2 лазерным излучением с длиной волны $\lambda_I = 193,3$ нм и при возбуждении в электронное состояние $b^1\Sigma_g^+$ излучением с $\lambda_I = 762,346$ нм. На основе численного моделирования показано, что для метановоздушных смесей лазерно-индуцированное возбуждение молекул O_2 в состояние $b^1\Sigma_g^+$ более эффективно с точки зрения сокращения времени индукции и температуры воспламенения, чем диссоциация молекул O_2 лазерным излучением. Для водородно-воздушных смесей, напротив, метод лазерно-индуцированного воспламенения, основанный на диссоциации молекул O_2 , более энергетически выгоден, чем метод, в основе которого лежит возбуждение кислорода в синглетное состояние $b^1\Sigma_g^+$.

В статье *Безгина Л. В., Копченкова В. И., Кулешова П. С., Старика А. М. и Титовой Н. С.* численно исследуется возможность интенсификации воспламенения водорода в сверхзвуковом слое смешения с воздушным потоком при лазерно-индуцированном возбуждении молекул O_2 в электронное состояние $b^1\Sigma_g^+$ и при фотодиссоциации молекул O_2 лазерным излучением в случае достаточно низких температур воздуха (800–900 К) при давлении $P_0 = 0,1$ –1 бар. Показано, что для значительного (в десятки и даже в сотни раз) сокращения длины задержки воспламенения достаточно облучения потока воздуха в слое толщиной 1–2 см на границе с водородной струей излучением с удельной энергией $\sim 3 \cdot 10^{-2}$ Дж/см³. Эквивалентный нагрев слоя воздуха оказывается существенно менее эффективным, чем рассмотренные методы лазерного воздействия, и не позволяет решить задачу снижения длины задержки воспламенения до приемлемого уровня.

Раздел 6 посвящен вопросам математического моделирования процессов различных режимов горения в условиях, близких к условиям в камерах сгорания реактивных двигателей для высокоскоростных летательных аппаратов, когда в потоке возникают слои смешения и различного рода газодинамические возмущения.

В работе *Савельева А. М., Брайнина Б. И. и Старика А. М.* рассматривается возможность повышения энергетических характеристик углеводородных топлив путем введения в них наночастиц легких металлов и металлоидов. На основе термодинамического подхода показана возможность увеличения экономичности турбореактивного двигателя за счет добавок к жидкому керосину В, Al, Be и BeH_2 . Например, при 20% содержании бора в двухкомпонентном горючем можно уменьшить потребный расход горючего в турбореактивном двигателе на 5%. Установлено, что введение в жидкое углеводородное топливо В, Al и Be позволяет заметно увеличить массу полезного груза при выводе спутников на геостационарную орбиту и повысить удельный импульс ракетного двигателя.

В статье *Безгина Л. В., Копченова В. И., Старика А. М. и Титовой Н. С.* рассматриваются особенности термодеструкции газообразного пропана при его нагреве и анализируется возможное влияние состава продуктов термодеструкции на процесс воспламенения в спутном потоке нагретого воздуха. Путем численного моделирования показано, что положительное влияние изменения состава топлива в процессе термодеструкции на воспламенение имеет место лишь для определенного состава продуктов разложения C_3H_8 . Положительный эффект определяется в значительной степени балансом концентраций водорода, стимулирующего развитие цепного процесса, и метана как наиболее трудно воспламеняемого компонента в образовавшейся при пиролизе пропана смеси.

В другой статье тех же авторов (*Безгин Л. В., Копченков В. И., Старик А. М. и Н. С. Титова*) анализируется возможность интенсификации формирования детонационного скачка при обтекании плоского клина сверхзвуковым потоком водородно-кислородной смеси. Показано, что возбуждение молекул O_2 в электронное состояние $b^1\Sigma_g^+$ резонансным лазерным излучением с длиной волны 762 нм перед носиком клина позволяет осуществить детонационное горение на рас-

стоянии ~ 1 м от носика клина при низкой температуре смеси (500–600 К). При этом достаточно проводить облучение газа в узкой приосевой области потока с поперечным размером 0,5–1 см. При отсутствии облучения для таких параметров потока не удастся сформировать детонационную волну на расстояниях, меньших 5,5 м от носика клина.

В следующей статье *Безгин Л. В., Копченков В. И., Старик А. М. и Н. С. Титова* провели численное исследование влияния термической неравновесности на формирование детонационной волны при обтекании клина сверхзвуковым потоком смеси $\text{H}_2\text{--O}_2$. Оказалось, что замедленное возбуждение молекулярных колебаний исходных реагентов за фронтом наклонной ударной волны, реализующейся при обтекании клина сверхзвуковым потоком газа, приводит к заметному увеличению длины зоны индукции и переходной зоны по сравнению с соответствующими величинами, полученными в рамках термически равновесной модели химической кинетики. Они также показали, что предварительное возбуждение молекулярных колебаний H_2 приводит к заметному (в несколько раз) сокращению длины зоны индукции за головной наклонной ударной волной и расстояния, на котором происходит образование стационарного детонационного скачка.

В разделе 7 рассмотрены различные физико-химические процессы, ответственные за образование экологически опасных газовых и аэрозольных компонентов в камерах сгорания и струях реактивных двигателей.

В работе *Лебедева А. Б., Секундова А. Н., Савельева А. М., Старика А. М. и Титовой Н. С.* предложена методика расчета эмиссионных характеристик авиационного двигателя, основанная на реакторной модели для диффузионной камеры сгорания и квазиодномерной модели для расчета течения газа в турбине, камере смешения и сопле. Численный анализ, проведенный для взлетного, крейсерского и номинального режимов работы двигателя, показал, что снижение тяги двигателя (от 100% до 30%) приводит к заметному уменьшению индексов эмиссии NO_x и H_2SO_4 (в 2–3 раза) и к сильному росту индексов эмиссии CO , несгоревших углеводородов C_xH_y и органики CH_2O . Сравнение с данными натурных экспериментов показало, что разработанная модель обладает высокой предсказательной способностью не

только для описания эмиссии NO_x и CO , но и органических соединений.

В статье *Савельева А. М., Рейн О. Э. и Старица А. М.* численно исследуется образование раствора $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{SO}_4$ на поверхности сажевых частиц в струе двигателя коммерческого дозвукового самолета. Показано, что количество осажденного на поверхности сажевых частиц раствора $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{SO}_4$ зависит от количества серы в топливе. При этом для достаточно мелких сажевых частиц с радиусом менее 10 нм доминирующим механизмом образования сульфатного раствора на поверхности частицы является коагуляция сульфатного аэрозоля с сажевыми частицами, а для более крупных — гетерогенная бинарная нуклеация $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{SO}_4$ из газовой фазы.

В следующей статье *Савельев А. М., Рейн О. Э. и Старик А. М.* проанализировали особенности формирования кристаллической фазы в бинарном растворе $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{SO}_4$, осажденном на сажевых частицах, эмитируемых двигателем самолета на крейсерском режиме полета. Они рассмотрели основные теоретические аспекты процесса формирования ядер кристаллизации в растворе $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{SO}_4$ и привели численные оценки динамики и условий замерзания такого раствора в выхлопной струе реактивного двигателя. Показано, что только в результате лавинообразной конденсации паров H_2O на сажевых частицах и, как следствие, формирования слабого раствора H_2SO_4 в капле возможно замерзание такого раствора на крейсерском режиме полета.

В последней статье раздела *Савельев А. М. и Старик А. М.* рассмотрели влияние неоднородности распределения молекулярных и ионных кластеров в выхлопной струе реактивного двигателя на формирование жидких аэрозольных частиц в следе самолета. На основе сопоставления с экспериментальными данными проводится критический анализ моделей образования жидких аэрозольных частиц в выхлопной струе реактивного двигателя. Определены области, в которых происходит рождение нейтральных и заряженных сульфатных частиц.

В заключение я хочу поблагодарить всех сотрудников отделения 600 и коллег из других организаций, без которых публикация этого сборника была бы невозможна. Особую благодарность хочу выразить руководству Центрального института авиационного моторостроения

им. П. И. Баранова и лично Генеральному директору Скибину Владимиру Алексеевичу и Первому заместителю Генерального директора Солонину Валентину Ивановичу, которые инициировали написание этого сборника и проявили искреннюю заинтересованность в его издании.

г. Москва

А. М. Старик