

ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, ГОРЕНИЕ И ВЗРЫВ, ФИЗИКА ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА

DOI: 10.18698/1812-3368-2015-6-85-98

УДК 534.222.2

ВЛИЯНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА РАЗВИТИЕ ГОРЕНИЯ ВБЛИЗИ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПРЕДЕЛОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

М.Ф. Иванов, А.Д. Киверин, И.С. Яковенко

Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Российская Федерация
e-mail: ivanov_mf@mail.ru; alexeykiverin@gmail.com; yakovenko.ivan@bk.ru

Методами математического моделирования исследовано влияние газодинамических процессов на развитие горения в замкнутых объемах, которые заполнены низкоактивными газообразными топливно-воздушными смесями околокритических составов, обеспечивающих воспламенение. Выделены физические механизмы, определяющие развитие неустойчивости фронта пламени и формирование режимов с очаговым характером сгорания горючей смеси. Отдельно отмечена роль плавучести горячих продуктов горения в поле силы тяжести и в развивающейся при этом конвективной неустойчивости. Конвективная неустойчивость, с одной стороны, обеспечивает стратификацию несгоревшей смеси и формирование обедненных областей, что препятствует полному сгоранию смеси, а с другой, может привести к формированию горячих термиков в смесях докритического состава, что представляет особый интерес для целей пожаро- и взрывобезопасности.

Ключевые слова: газодинамика горения, устойчивость горения, концентрационные пределы горения, прямое численное моделирование.

GAS-DYNAMIC PROCESSES INFLUENCE ON COMBUSTION EVOLUTION CLOSE TO CONCENTRATION FLAMMABILITY LIMITS

M.F. Ivanov, A.D. Kiverin, I.S. Yakovenko

Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation
e-mail: ivanov_mf@mail.ru; alexeykiverin@gmail.com; yakovenko.ivan@bk.ru

The paper considers numerically the influence of gas-dynamic processes on combustion propagation within the enclosed volumes filled with low active gaseous fuel-air mixtures close to the concentration flammability limit. The authors identify some physical mechanisms determining both the flame propagation instability and the formation of modes with a cellular nature of flammable mixture combustion. Of special interest is a buoyancy of hot combustion products in the gravity field, as well as the convective instability being developed during this process. On the one hand, the convective instability provides both the stratification of unburnt mixtures and

the formation of depletion regions, which prevent the mixture from being completely burnt out. On the other hand, it can result in forming hot thermals in the mixtures with undercritical composition. It is of primary concern for fire- and explosion safety.

Keywords: combustion gas dynamics, combustion stability, combustion concentration limits, direct numerical modelling.

Введение. Одной из актуальных задач современной физики горения и взрыва является исследование горения газообразных топливно-воздушных смесей. С одной стороны, детальный анализ развития различных режимов горения необходим при разработке новых и совершенствовании уже существующих технических систем, работа которых основана на эффективном сжигании топливно-воздушных смесей. С другой стороны, представления о характеристиках горения газообразных взрывоопасных смесей позволяют выбирать и обосновывать критерии и меры предупреждения рисков работы промышленных объектов, потенциально подверженных опасности разрушения в результате развития химического взрыва. Для определения области эффективного и безопасного применения газообразных топлив требуется детальное изучение особенностей развития горения в различных, важных с позиции практики, условиях. В настоящее время еще недостаточно изучено горение смесей, состав которых далек от стехиометрического. С позиции энергетики важно понимать потенциал и устойчивость горения бедных горючих смесей, тогда как с позиции взрывобезопасности необходимы энергетические и концентрационные критерии воспламенения, устойчивого горения и детонации такого рода смесей.

В качестве примера процессов горения в бедных смесях рассмотрим задачу о развитии тяжелой аварии на АЭС. В результате нарушения целостности реакторной зоны в объеме под защитной оболочкой (контайнментом) создаются условия для генерации водорода, прежде всего, за счет окисления циркониевых стержней. В результате сформированных под контайнментом конвективных течений водород распределяется в объеме, перемешиваясь с воздухом, водяным паром и другими продуктами окисления расплавов компонентов разрушающейся реакторной зоны [1]. Таким образом, в замкнутом помещении формируются области, заполненные водородсодержащими смесями с разной концентрацией водорода, отражающей его стратификацию в гравитационном поле [2]. Если концентрация водородно-воздушной смеси близка к стехиометрической, то ее воспламенение может быть инициировано достаточно слабыми источниками энергии [3]. При этом обеспечивается выход на устойчивое горение с возможностью его ускорения и формирования сверхзвукового пламени или детонации [4]. Воспламенение бедных смесей вследствие неустойчивостей только в редких случаях способно инициировать устойчивое горение, однако

возникающие при этом отдельные очаги горения при их конвективном переносе могут служить переносчиками энергии в область с большей концентрацией водорода, возбуждая в ней интенсивное горение. В результате вероятность развития горения в бедных смесях также должна учитываться при формулировании критериев взрывобезопасности [5], что невозможно без анализа процессов воспламенения и горения в неустойчивой области, характеризующейся низким содержанием горючего компонента (водорода) или низкой энергетикой источника воспламенения.

Настоящее исследование направлено на решение задачи детального анализа механизмов, определяющих распространение горения в бедных водородно-воздушных смесях. Процесс развития горения в бедных смесях весьма сложен и отличается большой неустойчивостью, что затрудняет его детальное экспериментальное изучение. Известны экспериментальные данные о смене режимов горения при изменении состава горючей смеси [6] от изотропного распространения очага горения в устойчивой области к пламени с развитой изрезанной газодинамическими неустойчивостями поверхностью и к режиму очагового сжигания смеси в объеме. Проведенное в рамках указанного исследования математическое моделирование нестационарного процесса горения бедных водородно-воздушных смесей позволило оценить роль ведущих физических механизмов в развитии того или иного режима горения.

Постановка задачи. По аналогии с мировыми экспериментальными исследованиями свойств горения газообразных смесей в зависимости от их состава и термодинамического состояния рассмотрим развитие горения в замкнутом объеме от локализованного источника энергии. Известны характерные пространственные масштабы и размеры камер сгорания, используемых в экспериментах [7–11], а также экспериментально полученные корреляции [12], указывающие на возможности масштабирования решаемой задачи. С учетом этого становится возможным использование подхода прямого численного моделирования исследуемых процессов на относительно небольших пространственных масштабах в камерах объемом в несколько литров. Рассмотрим развитие горения в цилиндрическом замкнутом объеме диаметром 20 см и высотой 10 см, заполненном водородно-воздушной смесью заданного состава. Иницирование горения будем задавать вблизи от нижнего торца цилиндра объемным источником тепловой энергии 100 мДж. Согласно экспериментальным данным [8], такое энерговыделение обеспечивает устойчивое воспламенение смесей с объемной долей содержания водорода более 5...6%. Соответственно, изучим смеси с близкими к указанным значениям составами. Следует

отметить, что используемая в настоящей работе кинетическая схема горения водорода при источнике тепловой энергии 100 мДж обеспечивает значение нижнего концентрационного предела воспламенения 4,2 % [13]. Область устойчивого горения соответствует составам с содержанием водорода более 10 %. Основу приведенного в работе анализа составляют расчеты горения смесей с 6, 8 и 10 %-ным содержанием водорода. Для выделения и иллюстрации различий динамики неустойчивого бедного и устойчивого пламени также рассмотрим развитие горения в протяженной полукоткрытой трубе диаметром 4 см, заполненной 16 %-ной смесью водорода с воздухом.

Расчеты динамики химически активной газовой смеси проводились на основе уравнений вязкой сжимаемой жидкости Навье – Стокса с учетом теплопроводности, многокомпонентной диффузии и энерговыделения за счет химических реакций. Решаемая численно, система уравнений Навье – Стокса имеет стандартный вид и подробно представлена в работе [14]. Коэффициенты вязкости, теплопроводности и многокомпонентной диффузии газовой смеси определяются исходя из известных соотношений кинетической теории газов для многокомпонентных сред [15]. Уравнения состояния свежей смеси и продуктов горения задаются на основе таблиц NASA путем интерполяции [16]. В качестве кинетической схемы горения водорода выбрана редуцированная схема Варнатца [13], удовлетворительно описывающая кинетику горения в достаточно широком диапазоне составов смеси и ее термодинамического состояния. Согласно последним исследованиям в области химической кинетики горения [17], большинство сформулированных кинетических механизмов достаточно хорошо воспроизводят такие основные характеристики горения, как время задержки воспламенения и ламинарная скорость горения. Однако в области бедных и богатых составов имеет место рассогласованность теоретических и экспериментальных данных. В области бедных составов допускается относительная погрешность 10 % для углеводородных топлив и 30 % для водородно-воздушных смесей [17], что обусловлено погрешностью используемых экспериментальных методик. Результаты, полученные по выбранной в настоящей работе кинетической схеме [13], вполне укладываются в допустимую экспериментальную погрешность. Таким образом, можно полагать, что выявленные в ходе данного исследования закономерности имеют по крайней мере правильный качественный характер и позволяют обобщить результаты работы на более широкий спектр околопредельных по составу смесей.

Система уравнений газовой динамики горения решалась численно эйлерово-лагранжевым методом [18] первого порядка точности по

времени и второго порядка точности по пространству, модифицированным и апробированным в ряде работ [14, 19]. Результаты, показывающие хорошую точность модифицированного численного метода в задачах горения водородсодержащих смесей, представлены в работах [20, 21]. Система уравнений химической кинетики решалась методом Гира. Настоящую статью можно рассматривать как продолжение серии работ авторов, посвященных исследованию горения водородно-воздушных и водородно-кислородных смесей [5, 22, 23]. В работе [5] показана роль термохимических и газодинамических факторов в формировании нижнего концентрационного предела воспламенения, а также рассмотрены особенности распространения горения вблизи зоны поджига в бедных смесях. В работе [22] рассмотрено ускорение пламени в открытых каналах, в работе [23] — динамика фронта пламени в закрытых каналах, заполненных стехиометрическими водородно-воздушными и водородно-кислородными смесями, в настоящей работе проанализирована эволюция бедного водородно-воздушного пламени в ограниченном объеме. Поскольку во всех перечисленных работах рассмотрен один и тот же физический процесс — горение газообразной горючей смеси, в основу исследований была положена одна и та же математическая модель.

Результаты. Для составления полной картины физических процессов, определяющих эволюцию пламени в замкнутом объеме, заполненном бедной водородно-воздушной смесью, рассмотрим вначале особенности развития горения высокоактивных смесей в открытых и закрытых объемах. Динамика свободно распространяющегося по покоящейся среде пламени определяется скоростью энерговыделения в зоне реакции и скоростью переноса теплоты и активных радикалов из зоны реакции в свежую несгоревшую смесь. В единицу времени на единицу площади поверхности пламени поглощается масса свежего горючего $\rho_f u_f$, где ρ_f , u_f — плотность горючей смеси и скорость горения. От рассматриваемой единицы площади фронта пламени в направлении, противоположном его распространению, в единицу времени отводится масса продуктов горения $\rho_b u_b$, где ρ_b , u_b — плотность и скорость продуктов горения. Баланс массы дает следующее соотношение для определения скорости отвода продуктов из зоны горения: $u_b = \Theta u_f$, где Θ — коэффициент расширения, равный отношению плотностей исходной горючей смеси и продуктов горения. Теперь рассмотрим расходящееся от сферического или цилиндрического очага пламя. Продукты горения, отведенные от диаметрально противоположных элементов поверхности фронта пламени, взаимодействуют в эпицентре очага горения в виде встречных потоков. Такого рода взаимодействие, аналогичное натеканию продуктов горения на стенку,

обеспечивает выталкивание продуктов горения (или, другими словами, их расширение). Расширяющиеся продукты горения формируют расходящийся поток газа, характеризуемый скоростью разлета Θu_f (это видимая скорость разлета, т.е. скорость фронта пламени в лабораторной системе отсчета). В горючей смеси, заполняющей большое (неограниченное) пространство, можно наблюдать изотропное распространение пламени с фиксированной скоростью Θu_f . В высокоактивной смеси на высокую ламинарную скорость горения гравитационное воздействие влияет мало, и пламя будет сохранять симметричную форму. Для низкоактивных бедных смесей скорость горения мала, что определяет медленное по сравнению с эффектами плавучести в гравитационном поле расширение очага. В этом случае наблюдается всплытие продуктов горения и соответствующая деформация поверхности фронта пламени.

Структура всплывающего в гравитационном поле очага горения водородно-воздушной смеси с концентрацией водорода 6% показана на рис. 1. В стехиометрической водородно-воздушной смеси концентрация водорода составляет 29,6%, а скорость ламинарного пламени — 2...3 м/с [24]. В таком случае скорость горения превосходит характерные скорости всех сопутствующих процессов, и динамика горения полностью определяется распространением в пространстве узкой (порядка долей миллиметров) зоны экзотермической реакции. В 6%-ной водородно-воздушной смеси скорость горения составляет менее 0,1 м/с. В ходе развития этого процесса наблюдается прогрев смеси вокруг зоны энерговыделения за счет теплопроводности и диффузии частично прореагировавшего газа, а также всплывание всей массы газа, разогретой в результате медленного горения (рис. 1, а, б). Таким образом, зона непосредственного горения оказывается внутри области повышенной температуры и всю систему упрощенно можно представить в виде пузыря разогретого газа в более холодной среде. При этом прирост нагретой массы газа и связанный с этим рост пузыря определяется здесь не испарением окружающей пузырь жидкости, а увеличением массы разогретых продуктов реакции за счет экзотермической реакции на фронте горения, поддерживающей также устойчивую границу пузыря с постоянным перепадом температуры между нагретой и холодной средами.

Далее попытаемся рассмотреть результаты проведенного математического моделирования горения бедных смесей, исходя из аналогии с всплыванием паровых пузырей [25, 26]. На начальной стадии процесса образовавшийся в районе поджига объем горящего газа имеет сферическую форму и под действием архимедовой силы начинает вертикальный подъем (см. рис. 1, а). Затем масса горячих газообразных

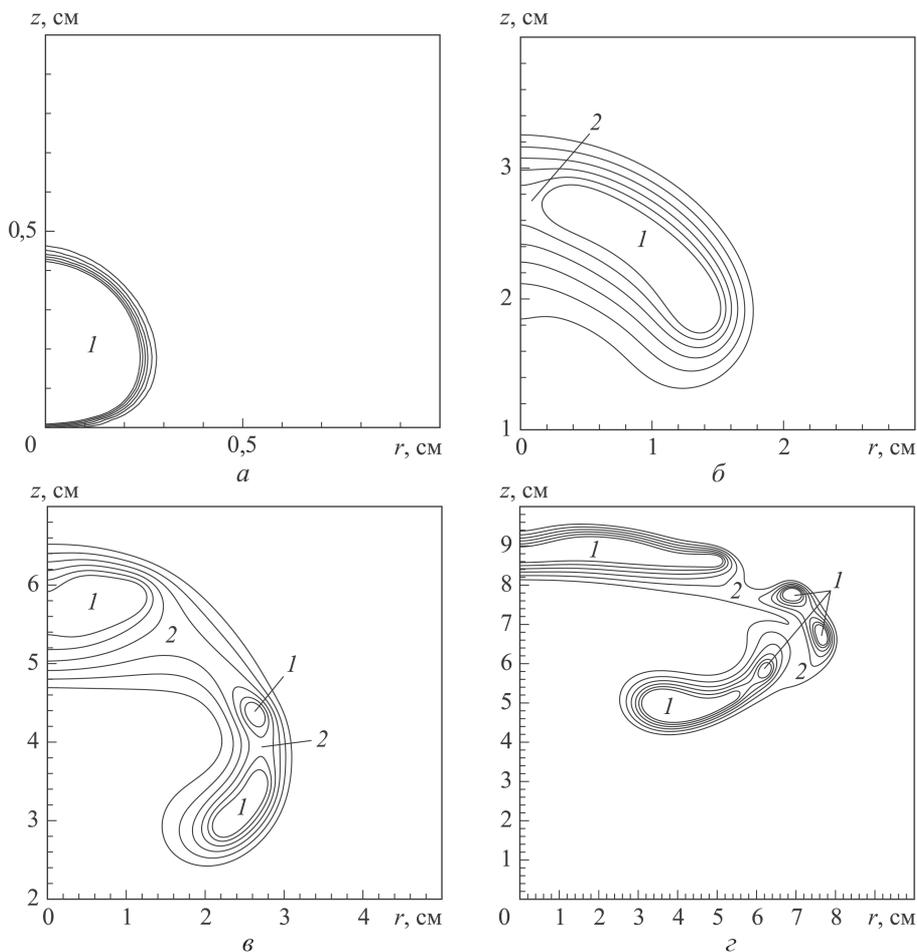


Рис. 1. Структура всплывающего в гравитационном поле очага горения водородно-воздушной смеси с концентрацией водорода 6% при различных стадиях развития очага горения в ограниченном объеме (инициирование вблизи нижнего торца):

левая граница — ось симметрии; 1 — область очага химической реакции; 2 — область затухания горения

продуктов горения деформируется, приобретая форму тора, который в процессе подъема сжимается к оси симметрии, формируя структуру, напоминающую всплывающий нагретый пузырь большого размера (см. рис. 1, б). В этом пузыре возникают пульсации скорости и давления [25]. Последующая эволюция образовавшейся структуры (далее термик) близка к эволюции пузыря. До сближения с верхней стенкой замкнутого объема термик движется, как и большой пузырь, с почти постоянной скоростью, а его взаимодействие с переотраженными от стенок акустическими волнами приводит к усилению собственных пульсаций (рис. 1, в), что в конечном счете ведет к разрушению изначальной структуры [25] и образованию ансамбля термиков меньшего масштаба (рис. 1, г).

Более подробно изучим динамические процессы, сопровождающие эволюцию термика. Если рассматривать элемент фронта пламени как движущийся источник энергии (что соответствует природе фронта пламени), то на фоне течения локальное энерговыделение и расширение газообразной среды внутри зоны реакции формирует волну сжатия, расходящуюся от каждого элемента поверхности фронта пламени. В случае симметрично расходящегося пламени имеют место два семейства волн сжатия, распространяющихся по продуктам горения в направлении эпицентра очага горения и по свежей смеси от фронта пламени. Волны, распространяющиеся в направлении эпицентра очага горения, пересекают эпицентр и достигают фронт пламени (со скоростью звука в продуктах горения $a_b > \Theta u_f$), перенося импульс и энергию свежей невозмущенной смеси совместно с волнами, излучаемыми от эпицентра. В случае свободного расходящегося пламени расходящиеся волны экспоненциально затухают, не давая значительного вклада в импульс и энергию потока. Если рассмотреть пламя в ограниченном объеме, то взаимодействие со стенками будет определять большую длительность жизни таких волн. Как это было показано в работе [23], роль отраженных волн в развитии горения высокоактивных смесей в ограниченных объемах становится принципиальной, определяя эволюцию поверхности фронта реакции за счет динамического воздействия и дополнительного нагрева и сжатия свежей смеси. В случае высокоактивных смесей, следовательно, и волн сжатия большей интенсивности уже на ранних стадиях развития горения взаимодействие фронта пламени с отраженными от стенок объема волнами приводит к существенной деформации поверхности фронта и формированию развитой ячеистой структуры фронта (рис. 2). Согласно классификации режимов горения на основе соотношения характерных пространственных и временных масштабов горения и внешнего газодинамического воздействия (турбулентности) [27], такое пламя опи-

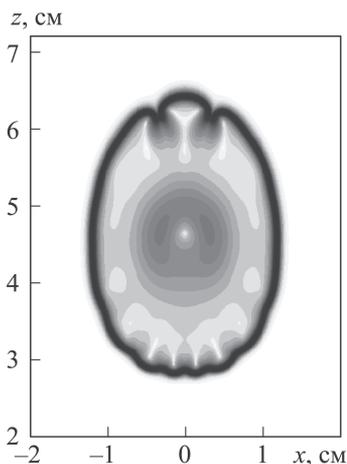


Рис. 2. Ячеистая структура поверхности фронта пламени, развивающегося в ограниченном объеме, заполненном 16%-ной водородно-воздушной смесью (иницирование на оси трубы на расстоянии ее диаметра 4 см от нижнего торца)

сывается как ячеистое (*wrinkled flame*) или как широкая зона реакции (*thickened flame*). В случае горения околопредельных смесей, как было отмечено выше, взаимодействие отраженных волн сжатия с нагретым неполностью прореагировавшим газом внутри всплывающего термика может приводить к формированию очагового режима горения смеси.

Более подробно рассмотрим эволюцию фронта пламени при всплытии горящего термика в гравитационном поле. Согласно структуре, приведенной на рис. 1, элемент фронта пламени, ориентированный вверх, распространяется практически без искажений в потоке восходящего течения. Боковой фронт подвержен развитию сдвиговых течений и акустическому воздействию, что ведет к его локальному растяжению и разрушению. Нижний фронт реакции растягивается за счет направленного вверх движения продуктов горения. Реакция начинается на нижнем крае фронта, но ввиду низкой активности горючей смеси не успевает реализоваться в полной мере, так как отток горячих продуктов горения вверх определяет падение теплового потока, и как следствие затухание реакции до ее перехода в экзотермическую стадию. В результате развития описанного процесса и разнесения в пространстве горячих продуктов горения в частично прореагировавшей и далее охлажденной смеси происходит формирование обедненной области в нижней части ограниченного объема, в котором изучается процесс. В конечном счете это определяет неполное сгорание топливно-воздушной смеси, возможное в режиме медленного горения (тления) только при обеспечении отсутствия оттока теплоты из системы (в математическом моделировании при задании адиабатических граничных условий на стенках объема). В более реалистичном случае изначально холодных стенок камеры сгорания имеем стратификацию из двух слоев: горячих продуктов горения и холодного обедненного горючего.

Заключение. Сформулируем основные газодинамические механизмы, определяющие развитие горения низкоактивных околопредельных горючих смесей в ограниченных объемах. В процессе развития фронт волны горения подвергается разномасштабным воздействиям газодинамической природы, что определяет эволюцию его структуры и, как следствие, динамику горения в системе. Расширение продуктов горения из области воспламенения определяет симметричное распространение пламени как контактного гидродинамического разрыва с химическим превращением и выделением энергии на его поверхности. Локальное выделение энергии во внутренней области термика определяет генерацию расходящихся волн сжатия, которые, в свою очередь, взаимодействуют со стенками камеры и оказывают обратное воздействие на потоки внутри объема и на фронт пламени. Плаучесть го-

рячих продуктов горения в гравитационном поле обеспечивает деформацию отдельных элементов поверхности фронта пламени, формирование областей сдвигового течения и развитие гидродинамической неустойчивости на поверхности фронта пламени. Сложное нелинейное взаимодействие выделенных газодинамических факторов приводит к разрушению первичного фронта пламени и к созданию условий для зарождения новых очагов воспламенения в нагретой частично прореагировавшей смеси. С уменьшением температуры при распаде фронта реакции радикалы (промежуточные продукты реакции) не могут более рекомбинировать, поддерживая насыщенный радикалами состав смеси. Температура внутри термика поддерживается за счет диссипации кинетической энергии внутри области сдвигового течения. В случае стратификации водорода в условиях его аварийного выброса в атмосферу под защитной оболочкой реактора АЭС при воспламенении обедненной смеси, дальнейшее формирование и всплытие описанной структуры (термика) может стать источником воспламенения скопившейся выше стехиометрической смеси. В результате возникает взрывное импульсное воздействие на оболочку с ее последующим разрушением. В связи с этим представляется важным реализация специализированных экспериментов, направленных на определение условий возникновения и характеристик описанных структур. С позиции их теоретического анализа отметим, что описанные структуры не являются ни пузырями в обычном представлении (так как в данном случае ничтожна роль поверхностного натяжения), ни многократно исследуемыми термиками от мощных источников тепловой энергии (так как рассматриваемые процессы развиваются в областях достаточно малых чисел Рейнольдса, менее 1000). Таким образом, вполне целесообразен их дальнейший анализ. Это позволит расширить представления о концентрационных и энергетических пределах воспламенения газобразных горючих смесей в условиях аварийного выброса горючего компонента.

Работа выполнена в рамках комплексной программы научных исследований Президиума РАН “Информационные, управляющие и интеллектуальные технологии и системы”.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mitigation of Hydrogen Hazards in Severe Accidents in Nuclear Power Plants*, IAEA-TECDOC-1661, IAEA, VIENNA, 2011.
2. *Auban O., Zboray R., Paladino D.* Investigation of large-scale gas mixing and stratification phenomena related to LWR containment studies in the PANDA facility // *Nuclear Engineering and Design*. Vol. 237. Iss. 4. P. 409–419.
3. *Льюис Б., Эльбе Г.* Горение, пламя и взрывы в газах. М.: ГИЛЛ, 1948. 448 с.

4. *Peraldi O., Knystautas R., Lee J.H.S.* Criteria for transition to detonation in tubes // Proc Comb. Inst. 1986. Vol. 21. P. 1629.
5. *Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Смыгалина А.Е.* Воспламенение водородно-воздушной смеси вблизи нижнего концентрационного предела // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2013. № 1. С. 89–108.
6. *Coward H.F., Jones G.W.* Limits of flammability of gases and vapors // Bulletin 503. US Bureau of Mines. 1952.
7. *Flammability* of methane, propane, and hydrogen gases / K.L. Cashdollar, I.A. Zlochower, G.M. Green, R.A. Thomas, M. Hertzberg // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2000. Vol. 13. Iss. 3–5. P. 327–340.
8. *SAFEKINEX* Report on the experimentally determined explosion limits, explosion pressures and rates of explosion pressure rise. Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM). 2002.
9. *Dahoe A.E.* Laminar burning velocities of hydrogen–air mixtures from closed vessel gas explosions // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2005. Vol. 18. P. 152–166.
10. *Kumar R.K.* Flammability limits of hydrogen-oxygen-diluent mixtures // J. Fire. Sci. 1985. Vol. 3. P. 245–262.
11. *Медведев С.П., Гельфанд Б.Е., Поленов А.Н., Хомик С.В.* Пределы горения водородовоздушных смесей в присутствии ультрадисперсных капель воды (тумана) // ФГВ. 2002. № 4. С. 3–8.
12. *Баратов А.Н., Корольченко А.Я., Кравчук Г.Н.* Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов и средства их тушения. В 2 кн. Кн. 1. М.: Химия, 1990. 496 с.
13. *Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р.* Горение. М.: Физматлит, 2003. 351 с.
14. *Ivanov M.F., Kiverin A.D., Liberman M.A.* Flame acceleration and DDT of hydrogen-oxygen gaseous mixtures in channels with no-slip walls // Intl. Journ. Hydrogen Energy. 2011. Vol. 36. P. 7714–7727.
15. *Гирифельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р.* Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: ИИЛ, 1961.
16. *McBride B.J., Gordon S., Reno M.A.* Coefficients for calculating thermodynamic and transport properties of individual species // NASA Technical Memorandum 4513. 1993. 89 p.
17. *Uncertainty* in stretch extrapolation of laminar flame speed from expanding spherical flames / F. Wu et. al. // Proc. Comb. Inst. 2015. Vol. 35. Iss. 1. P. 663–670.
18. *Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М.* Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент. М.: Наука, 1982.
19. *Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Клузов Б.А., Фортвов В.Е.* От горения и детонации к окислам азота // УФН. 2014. № 184. С. 247–264.
20. *Kiverin A.D., Kassoy D.R., Ivanov M.F., Liberman M.A.* Mechanisms of ignition by transient energy deposition: regimes of combustion waves propagation // Phys. Rev. E. 2013. Vol. 87 (3). P. 033015 (10).
21. *Ivanov M.F., Kiverin A.D., Liberman M.A.* Ignition of deflagration and detonation ahead of the flame due to radiative preheating of suspended micro particles // Comb. Flame. 2015. DOI:10.1016/j.combustflame.2015.06.018
22. *Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Гальбурт В.А.* Об одном способе ускорения перехода от дефлаграции к детонации в газообразных горючих смесях // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2008. № 4. С. 38–45.
23. *Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Рыков Ю.В.* Особенности распространения пламени в замкнутых объемах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2010. № 1. С. 21–38.
24. *Гельфанд Б.Е., Попов О.Е., Чайванов Б.Б.* Водород: параметры горения и взрыва. М.: Физматлит, 2008. 288 с.

25. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматлит, 1959. 699 с.
26. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. М.: Энергоатомиздат, 1990. 248 с.
27. Peters N. Laminar Flamelet Concepts in Turbulent Combustion // 21st Symposium (International) on Combustion, Combustion Institute, Pittsburgh. 1986. P. 1231–1256.

REFERENCES

- [1] Mitigation of Hydrogen Hazards in Severe Accidents in Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-1661, IAEA, Vienna, 2011.
- [2] Auban O., Zboray R., Paladino D. Investigation of large-scale gas mixing and stratification phenomena related to LWR containment studies in the PANDA facility. *Nuclear Engineering and Design*, vol. 237, iss. 4, pp. 409–419.
- [3] Lewis Bernard, Von Elbe Guenther. Combustion, Flames and Explosions of Gases. New York & London, Academic Press, 1961.
- [4] Peraldi O., Knystautas R., Lee J.H.S. Criteria for transition to detonation in tubes. *Proc Comb. Inst.*, 1986, vol. 21, pp. 1629.
- [5] Ivanov M.F., Kiverin A.D., Smygalina A.E. Ignition of hydrogen-air mixture near lower flammability limit. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2013, no. 1, pp. 89–108 (in Russ.).
- [6] Coward H.F., Jones G.W. Limits of flammability of gases and vapors. *Bulletin 503. US Bureau of Mines*, 1952.
- [7] Cashdollar K.L., Zlochower I.A., Green G.M., Thomas R.A., Hertzberg M. Flammability of methane, propane, and hydrogen gases. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2000, vol. 13, iss. 3–5, pp. 327–340.
- [8] SAFEKINEX Report on the experimentally determined explosion limits, explosion pressures and rates of explosion pressure rise. Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM), 2002.
- [9] Dahoe A.E. Laminar burning velocities of hydrogen–air mixtures from closed vessel gas explosions. *J. of Loss Prevention in the Process Industries*, 2005. vol. 18, pp. 152–166.
- [10] Kumar R.K. Flammability limits of hydrogen-oxygen-diluent mixtures. *J. Fire. Sci.*, 1985, vol. 3, pp. 245–262.
- [11] Medvedev S.P., Gel'fand B.E., Polenov A.N., Khomik S.V. Flammability Limits for Hydrogen. *Fizika goreniya i vzryva* [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 2002, no. 4, pp. 3–8 (in Russ.).
- [12] Baratov A.N., Korol'chenko A.Ya., Kravchuk G.N. Pozharovzryvobezopasnost' veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya. V 2 kn. Kn. 1 [Fire and Explosion Safety of Substances and Materials and Means of Their Extinguishing]. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 496 p.
- [13] Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. Combustion: physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation. 4th Ed. Berlin, Heidelberg, N.Y., Springer, 2006. 389 p.
- [14] Ivanov M.F., Kiverin A.D., Liberman M.A. Flame acceleration and DDT of hydrogen-oxygen gaseous mixtures in channels with no-slip walls. *Int. Journ. Hydrogen Energy*, 2011, vol. 36, pp. 7714–7727.
- [15] Hirschfelder J., Curtiss C.F., Byrd R.B. The Molecular Theory of Liquids and Gases. 2nd ed. N.Y., Joun Wiley & Sons, 1974.
- [16] McBride B.J., Gordon S., Reno M.A. Coefficients for calculating thermodynamic and transport properties of individual species. *NASA Technical Memorandum 4513*, 1993. 89 p.

- [17] Wu F. et. al. Uncertainty in stretch extrapolation of laminar flame speed from expanding spherical flames. *Proc. Comb. Inst.*, 2015, vol. 35, iss. 1, pp. 663–670.
- [18] Belotserkovskiy O.M., Davydov Yu.M. Metod krupnykh chastits v gazovoy dinamike. Vychislitel'nyy eksperiment [Method of Large Particles in Gas Dynamics. Computer experiment]. Moscow, Nauka Publ., 1982.
- [19] Ivanov M.F., Kiverin A.D., Klumov B.A., Fortov V.E. From combustion and detonation to nitrogen oxides. *Physics-Uspokhi*, 2014, vol. 57, pp. 234–249.
- [20] Kiverin A.D., Kassoy D.R., Ivanov M.F., Liberman M.A. Mechanisms of ignition by transient energy deposition: regimes of combustion waves propagation. *Phys. Rev. E*, 2013, vol. 87 (3), pp. 033015 (10).
- [21] Ivanov M.F., Kiverin A.D., Liberman M.A. Ignition of deflagration and detonation ahead of the flame due to radiative preheating of suspended micro particles. *Comb. Flame*, 2015. DOI:10.1016/j.combustflame.2015.06.018
- [22] Ivanov M.F., Kiverin A.D., Gal'burt V.A. About One Method of Acceleration of Transition from Deflagration to Detonation in Gaseous Inflammable Mixtures. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2008, no. 4, pp. 38–45 (in Russ.).
- [23] Ivanov M.F., Kiverin A.D., Rykov Yu.V. Peculiarities of Flame Propagation in Closed Volumes. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2010, no. 1, pp. 21–38 (in Russ.).
- [24] Gel'fand B.E., Popov O.E., Chayvanov B.B. Vodorod: parametry goreniya i vzryva [Hydrogen: Parameters of Combustion and Explosion]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 288 p.
- [25] Levich V.G. Fiziko-khimicheskaya gadrodinamika [Physico-Chemical Hydrodynamics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1959. 699 p.
- [26] Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Shreyber I.R. Volnovaya dinamika gazo- i parozhidkostnykh sred [Wave Dynamics of Gas and Vapor-Liquid Media]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 248 p.
- [27] Peters N. Laminar Flamelet Concepts in Turbulent Combustion. *21st Symposium (International) on Combustion*, Combustion Institute, Pittsburgh, 1986, pp. 1231–1256.

Статья поступила в редакцию 04.09.2015

Иванов Михаил Федорович — д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией Объединенного института высоких температур РАН.

Объединенный институт высоких температур РАН, Российская Федерация, 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2.

Ivanov M.F. — D.Sc. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences.

Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Izhorskaya ul. 13, building 2, Moscow, 125412 Russian Federation.

Киверин Алексей Дмитриевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Объединенного института высоких температур РАН.

Объединенный институт высоких температур РАН, Российская Федерация, 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2.

Kiverin A.D. — Ph.D. (Phys.-Math.), Senior Research Fellow, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences.

Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Izhorskaya ul. 13, building 2, Moscow, 125412 Russian Federation.

Яковенко Иван Сергеевич — аспирант, младший научный сотрудник Объединенного института высоких температур РАН.

Объединенный институт высоких температур РАН, Российская Федерация, 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2.

Yakovenko I.S. — Ph.D. student, Research Fellow, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences.

Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Izhorskaya ul. 13, building 2, Moscow, 125412 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Яковенко И.С. Влияние газодинамических процессов на развитие горения вблизи концентрационных пределов воспламенения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2015. № 6. С. 85–98.

Please cite this article in English as:

Ivanov M.F., Kiverin A.D., Yakovenko I.S. Gas-dynamic processes influence on combustion evolution close to concentration flammability limits. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2015, no. 6, pp. 85–98.