

ДИНАМИКА МАКРОПРОЦЕССОВ В ПЛАМЕНИ И НАГРЕТОЙ СТРУЕ

А. А. Кузнецов, О. Д. Бухарова

Владимирский государственный университет, 600026 Владимир

На основе спектрального и корреляционного анализов трех колебательных процессов: гидродинамического, акустического и электрического, генерируемых при работе метеотрона, выявлен ряд закономерностей поведения крупномасштабного пламени и нагретой струи. Диапазон исследуемых частот $0,03 \div 20$ Гц.

УСТАНОВКА

Авиационный керосин ТС-1 с технологической присадкой калия (4 кг/м^3) сжигался в атмосфере с помощью установки метеотрон [1] с расходом топлива $8,8 \text{ кг/с}$. Расчетная тепловая мощность установки $\approx 0,4 \cdot 10^9 \text{ Вт}$. Давление перед форсунками до 15 МПа . Горение сильно турбулизированное, диффузионное, визуально бездымное. Пламя объемом $\approx 10^3 \text{ м}^3$ и высотой до 12 м приподнято над поверхностью земли на расстояние $\approx 4 \text{ м}$ (рис. 1). Режимы работы установки стационарный и переменный, с изменяющимся по задаваемому закону давлением подачи топлива на форсунки. Поток продуктов сгорания заряжен отрицательно в процессе положительной поверхностной ионизации атомов калия на частицах сажи в пламени [2]. Схема метеотрона приведена на рис. 2.

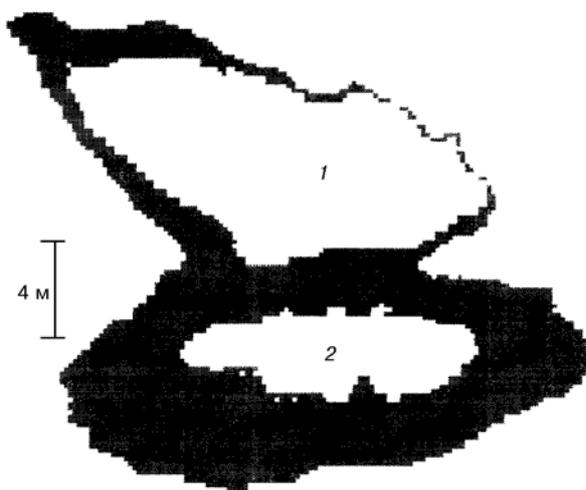


Рис. 1. Пламя установки метеотрон:
1 — приподнятое пламя, 2 — проекция на поверхность земли

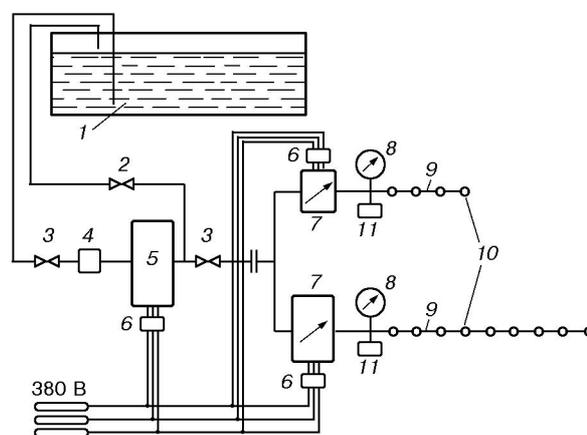


Рис. 2. Схема установки метеотрон:

1 — емкость с керосином ТС-1; 2 — нормально закрытый вентиль системы перепуска при заправке емкости 1; 3 — вентили; 4 — расходомер; 5 — подкачивающий центробежный насос низкого давления; 6 — магнитные пускатели; 7 — плунжерные насосы высокого давления с регулируемой производительностью; 8 — стрелочные манометры для контроля давления на выходе насосов; 9 — магистрали высокого давления, заканчивающиеся тепловыделяющими элементами; 10 — форсунки; 11 — потенциметрические датчики для регистрации сигнала с 8

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Проведена серия экспериментов по синхронной регистрации в диапазоне частот $0,03 \div 20$ Гц вертикальной составляющей напряженности $E_z(t)$ электрического поля, звукового давления $L(t)$ и давления $p(t)$ топлива на форсунках метеотрона. Соответственно приемниками регистрируемых сигналов являлись электростатический зонд — вертикальный несимметричный диполь [3–6] с эффективной высотой 1 м , расположенный на расстоянии 25 м от пламени; приемник инфразвуковых колебаний [6, 7] и реохордный дат-

чик давления топлива на форсунках установки [6]. Регистратором служил шестнадцатиканальный прибор ЭЭГУ16-02. На плоских участках амплитудно-частотных характеристик трех указанных выше измерительных каналов их чувствительность составляла соответственно 0,8 мВ/(м·мм), 0,06 Па/мм, 10^6 Па/мм.

Для контроля метеопараметров в приземном слое на расстоянии 50 м от метеотрона располагалась метеостанция, оборудованная датчиками скорости и направления ветра, температуры и влажности [8]. Угол между направлением на установку и направлением на Север составлял 102° .

В работе анализируются в основном результаты двух комплексных экспериментов, проведенных 31.10.81. Метеообстановка до начала первого эксперимента (10 ч 00 мин): солнечная устойчивая погода, температура $\pm 0,5^\circ\text{C}$, скорость ветра $0 \div 0,5$ м/с, направление ветра северо-западное, влажность 85 %, давление 747 мм. рт. ст.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

При работе установки в стационарном режиме спектры рассматриваемых процессов рассчитывались по автокорреляционной функции с применением прямоугольного временного «окна» [9]. Спектральная плотность энергии (рис. 3) и спектры звукового давления (рис. 4) имеют вид гладких кривых и выделяют лишь максимальные значения, одинаковые по порядку величины. Все другие экстремумы сглаживаются.

Как видно из рис. 3, 4, спектры имеют ряд индивидуальных особенностей. Зависимость $E_z(t)$ на участке спектра $0,05 \div 3,75$ Гц представлена спадающей экспоненциальной кривой, а зависимость $L(t)$ — линией, почти параллельной оси частот (рис. 5). Максимальные плотности энергии в обоих спектрах лежат в диапазоне геоакустических частот.

Для того чтобы детализировать поведение процесса в диапазоне частот $0,05 \div 62,5$ Гц, проведен анализ (рис. 6) с уменьшенным шагом дискретизации и применением «окна» Парзена [9]. Это позволило выделить узкие резонансные области [10]. Однако при этом погрешность каждой расчетной точки спектра воз-

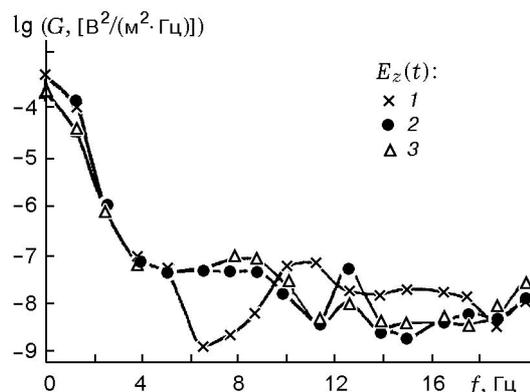


Рис. 3. Спектры вариаций E_z -составляющей электрического поля:

1, 2, 3 — последовательные участки амплитудных диаграмм $E_z(t)$; режим работы установки — стационарный

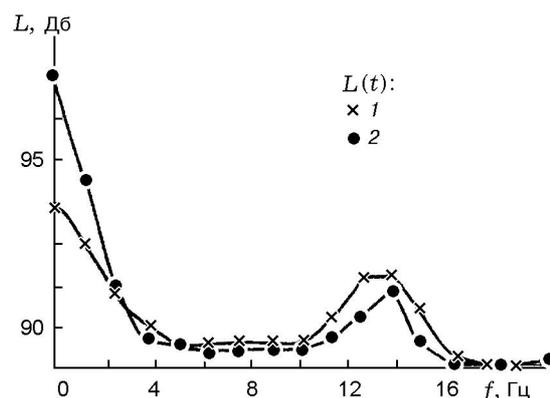


Рис. 4. Спектры звукового давления:

1, 2 — последовательные участки амплитудных диаграмм $L(t)$; режим работы установки — стационарный

растает. Кроме того, возможны отрицательные значения плотности энергии в определенном интервале частот исследуемого диапазона, что означает потерю информации о спектре процесса в данном интервале. Поэтому кроме уменьшения шага дискретизации выборочек необходимо использовать другие методики, например, исследование автокорреляционных функций процессов, и расчеты распределения плотности энергий по другим методикам, например, фурье-анализ. Необходимо также учитывать, что приемная антенна может регистрировать только изменения (вариации) dE_z/dt вертикальной составляющей напряженности электрического поля. Это подтверждается амплитудно-частотными характеристика-

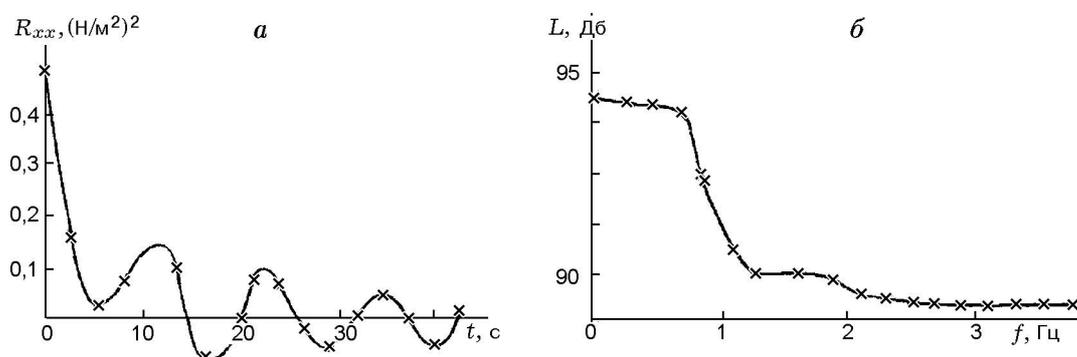


Рис. 5. Автокорреляционная функция процесса (а) и спектр звукового давления (б): режим работы установки — стационарный

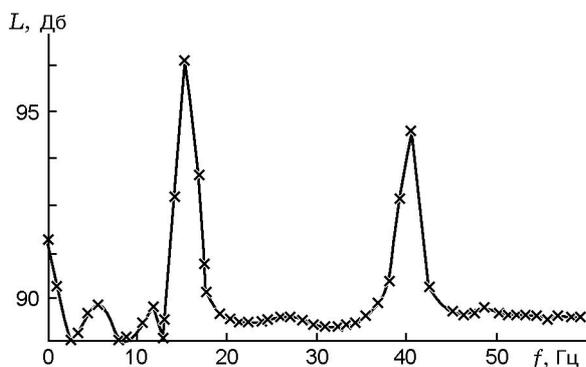


Рис. 6. Спектр звукового давления процесса: режим работы установки — стационарный

ми приемного блока, полученными в калибровочном поле плоского конденсатора однородного вертикального электрического поля. Амплитуда сигнала резко падает с уменьшением частоты и на частоте 0,5 Гц отличается от действительного на два порядка. При постоянной напряженности калибровочного поля средний уровень сигнала определяется уровнем внешней помехи.

Результаты статистической обработки данных экспериментов с учетом последнего замечания приведены в таблице.

Как показал анализ, корреляционную связь между указанными процессами на стационарном режиме работы можно ожидать только в узком интервале частот ($\approx 0,08$ Гц), причем эта связь относительно слабая, поскольку на данной частоте вклад в энергетический спектр со стороны процесса $L(t)$ мал.

Расчет, проведенный по коэффициентам парной и ранговой корреляции при одновременной обработке характеристик рассматрива-

емых процессов, и анализ динамики корреляционных связей электрических и акустических процессов при работе метеотрона на стационарном режиме показали следующее:

1) текущие значения коэффициентов не превышают уровня значимости, что свидетельствует об отсутствии единых мощных источников генераций электрических и акустических колебаний в исследуемом диапазоне частот;

2) оба процесса имеют периодическую составляющую в спектрах на частоте $\approx 0,08$ Гц.

Во всех случаях источники колебаний, вероятно, обладают значительной протяженностью. Об этом свидетельствует относительно большой период колебаний звукового давления и вектора напряженности электрического поля. В условиях проведенных экспериментов этими источниками могут быть нагретая вертикальная струя [11–13], а также акустические и электрические резонаторы типа «поверхность земли — атмосферный слой». Но если акустические резонансные частоты значительно меньше рассматриваемых ($\approx 0,1$ Гц) и приходятся на геоакустический диапазон нулевых частот, то электрические частоты значительно выше рассматриваемых и равны 2 и 16 Гц. Как видно из диаграмм амплитуд обоих процессов, время уменьшения амплитуд колебаний регистрируемых параметров до уровня амплитуд сопутствующих эффектов приблизительно равно периоду колебания ($\approx 13,5$ с).

В качестве источника переменного электрического поля был предложен ионно-конвекционный генератор на сажевых частицах [2, 14]. В нашем случае он может включать в себя два процесса. Первый характеризует динамику потока в струе на относительно малых высотах (до $200 \div 500$ м в зависимости от ме-

Местонахождение максимумов функций распределения плотности энергии на частотной оси

Характеристики процесса	Минимальное значение максимума	Максимальное значение максимума	Максимумы	Характер колебаний
$L(t)$	$\approx 0,1$ Гц	≈ 14 Гц	0,08 ÷ 0,1	Периодические слабо выраженные колебания
			3,5 ÷ 5,5	Почти периодические, с биениями
			13 ÷ 14,5	Периодические сильно выраженные колебания
$E_z(t)$	≈ 16 Гц	$\approx 0,08$ Гц	0,08 ÷ 0,3	Периодические колебания
			0,5 ÷ 1,5	Импульсные, с экспоненциальным затуханием
			16	Периодические слабо выраженные колебания

теоусловий) и соответствует продольным газодинамическим колебаниям в струе, а второй процесс соответствует поперечным колебаниям струи как целого [10, 15]. Наиболее существенным с точки зрения энергоклада в процесс генерации переменного электрического поля является второй механизм. Это подтверждается экспериментами по регистрации вариаций электрической составляющей напряженности электромагнитного поля Земли на расстоянии 16 км от метеотрона до, во время и после работы метеотрона в стационарном режиме. Данные эксперименты подтвердили наличие процесса генерации электрического поля вертикальной нагретой струей. Шунтирующий эффект струи [16] в качестве источника квазиэлектростатического поля для внешнего электрического поля Земли в этих экспериментах проявляется после шестидесяти второй секунды работы метеотрона в виде уменьшения амплитуды скорости вариаций электрической составляющей напряженности естественного электромагнитного поля Земли. Этот период соответствует характерному времени формирования электрического поля нагретой струи. Запаздывание регистрируемого электрического сигнала относительно момента зажигания топливной смеси составило 2,2 с. Этот период может быть временем формирования электрического поля пламени.

Итак, источником возбуждения обоих процессов на частоте $\approx 0,08$ Гц может быть протяженная заряженная нагретая струя про-

дуктов сгорания, осциллирующая с частотой $\approx 0,08$ Гц. Для такого типа излучателя звука геометрический размер (протяженность) обуславливает частоту излучения, а относительная скорость перемещения — мощность, излучаемую на данной частоте. Поэтому мощность получается малой, а частота — инфразвуковой. Для излучателя электрического поля протяженность обуславливает и мощность, и частоту основной моды.

Нагретая струя как излучатель инфразвука является непрерывным источником, так как вихри при перемещении не генерируют звуковых колебаний, а в качестве излучателя электрического поля струя является дискретным источником и состоит из перемещающихся с разной скоростью вихрей разных размеров [17]. Каждый вихрь служит излучателем электрического поля с возрастающими вверх по вертикали геометрическими размерами и соответственно уменьшающимися объемной плотностью отрицательного избыточного заряда и скоростью перемещения. Граничная частота 0,5 Гц показывает, что антенна различает 2–3 такие дискретные структуры в тепловой струе. Таким образом, механизм генерации излучения электрического поля определяется двумя источниками — непрерывным и дискретным.

Механизм излучения инфразвука так же, как и минимум, двойкой [15, 18, 19]. Расчет периодичности срывов потока на границах пламени с использованием закона Колмогорова — Обухова [20] определяет верхнюю граничную

частоту турбулентности 5 Гц, что соответствует выделенному на энергетическом спектре интервалу частот. Несовпадение частот образования заряженных вихрей ($\approx 1,5$ Гц) и частоты пульсаций на границах пламени ($4 \div 5$ Гц) указывает на их статистическую независимость. Можно предположить наличие как минимум двух относительно мощных процессов вихреобразования в области начального сечения тепловой струи. При этом более высокочастотный ($4 \div 5$ Гц) вероятнее всего расположен в зоне максимальных скоростей (а значит, и температур), т. е. над ядром пламени, и интерпретируется как почти периодические нарушения потенциальности потока; менее высокочастотный ($\approx 1,5$ Гц) находится в зоне приграничных течений струи, наиболее насыщенной частицами сажи, являющимися носителями избыточного отрицательного заряда.

Аналогичные рассуждения приводят к предположению о соответствии максимумов в спектрах процессов на частотах ≈ 14 и 16 Гц наиболее высокоскоростным механизмам из исследованных, а значит, процессам внутри пламени [21–23] и пульсациям фронта пламени [24].

Исходя из вышесказанного можно заключить, что в стационарном режиме работы установки пламя работает как маломощный монополь, причем само пламя избыточно заряжено. Эффект монопольного излучения даже при малых перемещениях фронта (пульсации с частотой автоколебаний) очень сильный и сравним с эффектами вихреобразований. Однако интенсивность генерации электрических колебаний мала и много меньше интенсивности генерации акустических колебаний нагретой струей [25].

Для подтверждения достоверности обнаруженных механизмов генерации и идентификации источников был использован переменный режим работы метеотрона, характеризующийся колебаниями давления подачи топлива и, следовательно, объема пламени во времени с заданной частотой и с глубиной модуляции до 100%. В этом случае непрерывная нагретая струя превращалась в разрывную, состоящую из последовательности перемещающихся по вертикали нагретых объемов продуктов сгорания. Переход на переменный режим работы позволяет значительно снизить плотность мощности обоих колебательных процессов на нулевых частотах (ниже 0,03 Гц), что, в свою очередь, позволяет провести анализ корреляционных функций характеристик процессов. При

этом получены функции относительных времен запаздывания инициирования процессов и максимальных коэффициентов корреляции от частот. Установка работала на фиксированных частотах модуляции давления подачи топлива на форсунки: 0,08; 0,17; 0,4; 0,50 и 0,92 Гц. При этом время работы изменялось от 90 до 15 с. По обнаруженному эффекту смены знака корреляций обеих пар исследуемых процессов [26, 27] в интервале частот $0,2 \div 0,3$ Гц сделан вывод о смене механизма излучения для процесса генерации инфразвука, превалирующего по плотности мощности от дипольного — струей, к монопольному — пульсирующей сферой; для генерации электрических колебаний — переход от генерации непрерывным источником к генерации дискретным источником. Спектральный анализ электрических процессов, генерируемых в стационарном режиме, показывает, что частота 0,5 Гц является нижней граничной частотой интервала $0,5 \div 1,5$ Гц, на который приходится значительная доля энерговыделения. Поэтому данный источник генерации предлагается трактовать как термик с характерной частотой отрыва ≈ 1 Гц. Этот вывод косвенно подтверждается максимальным временем задержки сигнала $E(t)$ от $p(t)$, приходимся на частоту 0,5 Гц. Вероятно, интервал времени ≈ 2 с оптимален для включения процесса аккумуляции и отрыва спонтанного термика.

Теоретический анализ выявил следующие основные закономерности.

1. Функции скоростей изменения горизонтальной (dE_r/dt) и вертикальной (dE_z/dt) составляющих генерируемого электрического поля сильно отличаются, при этом если производная dE_r/dt меняет знак на определенной высоте местонахождения термика, то dE_z/dt сохраняет знак на всем пути движения термика.

2. Функция отношений этих скоростей позволяет на основе выбора диаграммы направленности приемной антенны и ее местоположения определить местоположение характерного сечения тепловой струи, где вектор ускорения частиц меняет направление.

Поэтому был сделан вывод о необходимости двух типов антенн — горизонтального и вертикального диполей. При этом первый наиболее эффективен при регистрации процессов формирования и срыва вихрей, второй — при исследовании динамики их перемещения вверх по вертикали.

ВЫВОДЫ

- Процессы в крупномасштабном пламени и вертикальная нагретая струя генерируют в окружающем пространстве электрические и акустические колебания.

- Механизмы генерации электрических и акустических колебаний связаны с наличием непрерывных и дискретных источников.

- Единым непрерывным источником возбуждения обоих колебательных процессов в узком интервале частот ($\approx 0,08$ Гц) является протяженная заряженная нагретая вертикальная струя; мощные единые источники генерации электрических и акустических колебаний отсутствуют во всем исследуемом диапазоне частот.

- Дискретные источники возбуждения обоих колебательных процессов физически независимы, а статистическая связь между ними определена посредством гидродинамических колебаний $p(t)$.

- Пожары крупных лесных массивов, нефтяных скважин и т. п. можно регистрировать на значительном расстоянии от них по наличию в спектре звукового давления инфразвуковых составляющих; мощность или плотность мощности теплового источника, характеризующие высотой подъема вертикальной нагретой струи, определяют положение максимума на частотной оси спектра звукового давления; их увеличение приводит к смещению максимума на частотной оси спектра звуковых колебаний в сторону нулевых частот; спектр звуковых колебаний от распределенных мощных тепловых источников содержит соответствующее количество максимумов (в общем случае разной амплитуды и разного местоположения на частотной оси).

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 938831, СССР. Метеотрон / Н. Г. Конопасов, В. Н. Кунин. Заявл. 15.04.80, № 291469/30-15. Оpubл. в Б. И. 1982. № 24. А 01 15/00.
2. Кузнецов А. А., Кунин В. Н., Конопасов Н. Г. Ионно-конвекционный генератор на сажевых частицах // XV Всесоюз. конф. «Актуальные вопросы физики аэродисперсных систем»: Тез. докл. Одесса, 1989. Т. 2. С. 156.
3. Ватажин А. Б., Лихтер В. А., Рушайло А. М., Шульгин В. И. Электрические пульсации в турбулентных газодинамических потоках // Изв. АН СССР. Механика жидкостей и газов. 1977. № 2. С. 148–159.
4. Кунин В. Н., Залазаев П. М., Конопасов Н. Г. Антенные устройства КНЧ диапазона // Радиопомехи КНЧ диапазона и их природа. Рязань: РРТИ, 1976. С. 3–10.
5. Кашпровский В. Е. Экспериментальное исследование распространения радиоволн. М.: Наука, 1980.
6. Кузнецов А. А. Исследование тепло- и электрофизических свойств мощной тепловой струи: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Одесса: ОГУ, 1988.
7. Конопасов Н. Г., Кунин В. Н., Кузнецов А. А. Приемник инфразвука. М., 1982. Деп. в ВИНТИ 02.04.82, № 1548.
8. Кузнецов А. А., Бухарова О. Д. Движение воздуха в приземном слое при работе метеотрона // Прикладные проблемы механики жидкости и газа. III научн. конф. ученых России и Украины: Тез. докл. Севастополь: СГТУ, 1994. С. 29.
9. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1972. Т. 1, 2.
10. Кузнецов А. А., Конопасов Н. Г. Акустические колебания, генерируемые крупномасштабным пламенем метеотрона // XIV Всесоюз. семинар «Электрофизика процессов горения»: Тез. докл. Караганда, 1989. С. 86.
11. Конопасов Н. Г., Шарина З. Г., Кузнецов А. А. О возможности воздействия на местное электрическое поле Земли мощной тепловой вертикальной струей // Радиопомехи КНЧ диапазона и их природа. Владимир, 1980. С. 29–33.
12. Гостинцев Ю. А., Суханов Л. А. Конвективная колонка над линейным пожаром в однородной изотермической атмосфере // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 5. С. 675–685.
13. Гостинцев Ю. А., Суханов Л. А. Конвективная колонка над линейным пожаром в политропической атмосфере // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 3. С. 3–8.
14. Бабат Г. И. Ионно-конвекционные генераторы постоянного и переменного тока // Журн. техн. физики. 1936. Т. 6, вып. 8. С. 1319–1333.
15. Гостинцев Ю. А., Иванов Е. А., Шацких Ю. В. Инфразвуковые и внутренние гравитационные волны в атмосфере при больших пожарах // Докл. АН СССР. 1983. Т. 271, № 2. С. 327–330.
16. Кузнецов А. А., Кунин В. Н., Конопасов Н. Г. и др. Локальное электростатическое поле, возникающее при работе метеотрона // XV Всесоюз. семинар «Электрофизика процессов горения»: Тез. докл. Чебоксары, 1990. С. 26.
17. Гостинцев Ю. А., Новиков С. С., Суханов Л. А. О вихревой структуре быстрораспространяющихся пожаров // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11, № 3. С. 394–403.
18. Гостинцев Ю. А., Копылов Н. П., Суханов Л. А. и др. Горение нефти на водной поверхности (крупномасштабный экспери-

- мент) // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 4. С. 36–39.
19. **Гостинцев Ю. А., Иванов Е. А., Копылов Н. П., Шацких Ю. В.** Волновые возмущения атмосферы при больших пожарах // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 4. С. 62–64.
 20. **Ландау Л. Д., Лившиц Е. М.** Теоретическая физика: Учебное пособие. Т. VI: Гидромеханика. М.: Наука, 1983.
 21. **Lighthill M. J.** On sound generated aerodynamically. II. Turbulence as a source of sound // Proc. Roy. Soc. 1954. V. 222.A. P. 1–32.
 22. **Bragg S. L.** Combustion noise // J. Inst. Fuel. 1963. V. 36, N 264. P. 12–16.
 23. **Абугов Д. А., Обрезков О. И.** Звуковой шум турбулентного пламени // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 5. С. 63–71.
 24. **Кидин Н. И., Либрович В. Б.** О механизме излучения звука турбулентным газовым пламенем // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 4. С. 13–17.
 25. **Гостинцев Ю. А., Иванов Е. А., Анисимов С. В. и др.** О механизме генерации инфразвуковых волн в атмосфере большими пожарами // Докл. АН СССР. 1985. Т. 283, № 3. С. 573–576.
 26. **Кузнецов А. А., Конопасов Н. Г.** Эффект смены знака корреляций электрических и гидродинамических колебательных процессов при работе метеотрона // XVI Всесоюз. семинар «Электрофизика процессов горения»: Тез. докл. Челябинск, 1991. С. 12.
 27. **Кузнецов А. А.** Исследование мощной тепловой струи метеотрона // II Всесоюз. семинар «Динамика пространственных и неравновесных течений»: Тез. докл. Челябинск; Миасс, 1991. С. 53–55.

*Поступила в редакцию 5/1 1999 г.,
в окончательном варианте — 23/III 2000 г.*