

УДК 621.45.072:534.222.2

В. Н. ЖУРАВЛЁВ*ГП «ЗМКБ Прогресс» им. акад. А. Г. Ивченко, Запорожье, Украина***ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИЗЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ ЗВУКА В ПРОЦЕССЕ ГОРЕНИЯ**

Для пояснения неполной адекватности гипотезы процесса звукового излучения энергии в процессе горения топлив предложены феноменологические физическая и математическая модели фазового перехода второго рода в газовых смесях, поясняющие свойство их максимальной проводимости для потока энергии. Показан процесс образования детонационных вихревых структур в процессе изменения термодинамического потенциала, который инициирует плавное изменение параметра порядка молекул и скачкообразное изменение параметров теплоемкости и теплопроводности газовых смесей. Проведены теоретические и расчетные исследования, доказывающие адекватность предложенных моделей физическим процессам.

Ключевые слова: энергия, параметр порядка, фазовый переход, вихревой поток, скорость звука.

1. Введение.**Постановка проблемы**

Несмотря на длительное изучение феномена излучения звука в процессе турбулентного и детонационного горения топлив, до сих пор отсутствует общепризнанная физическая и математическая модели, поясняющие процесс переноса энергии со скоростями, равными и превышающими скорость звука [1]. Фундаментальная теория Л. Д. Ландау [2] поясняет процесс звукового излучения, однако в ней анализируется объемная скорость звука и не рассмотрен процесс сверхзвуковых течений газа. В работах Я. Б. Зельдовича [3, 4], развивающих работы Л. Д. Ландау в части детонационного горения топлив, сверхзвуковые течения обоснованы введением понятия пересжатой ударной волны, скорость которой равна скорости движения молекул, однако не рассмотрены вопросы изменений параметра порядка и фазовых превращений в процессе детонации. Исследование параметров фазовых переходов и излучения звука в области сверхнизких температур, являющееся развитием работ Л. Д. Ландау в части изучения «второго» звука в жидком гелии, изложено в диссертации [5], однако в ней не рассматриваются фазовые переходы процессов горения. Процесс возникновения фазового перехода при передаче энергии в газовых смесях предложен в работе [6], однако в ней не рассмотрен вопрос изменения параметра порядка молекул газа. Нами не обнаружены результаты исследований условий неустойчивости в критической точке параметра порядка вещества при ламинарно-турбулентном переходе в процессе горения. Вместе с тем известно, что именно феномен неустойчивости вызывает турбулентный режим течения. Это положение, высказанное в конце про-

шлого столетия О. Рейнольдсом и Дж. В. С. Рэлеем как гипотеза, сейчас – твердо установленный факт.

Таким образом, актуальной проблемой является разработка модели, которая должна описать причинно-следственные связи, инициирующие неустойчивость параметра порядка молекул. При оценке адекватности теории и гипотезы анализируемого физического процесса целесообразно применение критериев А. Эйнштейна «внешнего и внутреннего оправданий» [7]. Первый критерий предполагает соответствие теории известным фактам, полученным в результате экспериментальных исследований. Второй, допуская некоторую неопределенность в части адекватности оцениваемой теории, требует «естественности» и «логической простоты» предпосылок, что наиболее сильно ограничивает «аргюи» параметры качества рассматриваемых процессов.

2 Теоретическая часть

Проведём анализ традиционных подходов к анализу скорости передачи энергии со скоростью звука в веществе канала передачи.

2.1. *Традиционная модель анализа объемной скорости звука.* Средняя квадратичная скорость элементарных носителей энергии вещества $\langle v \rangle$ – молекул воздуха, обладающих массой m_m известна [8] и определяется (при постоянной температуре $T^0 = \text{const}$) исходя из фундаментальной формулы энергии молекул $E_m = \frac{3}{2} kT^0 = \frac{m_m \langle v \rangle^2}{2}$, где

T^0 – температура газа по Кельвину, k – постоянная Больцмана. Проведем анализ подхода [9] определения *объемной* скорости звука $\langle v_s \rangle$ в газе (где $\langle v_s \rangle$

предполагает вычисление математического ожидания скорости молекул v_s в единичном объеме газа).

Считается, что адекватный метод определения скорости звука, без учета процессов, происходящих в передатчике и приемнике звуковых волн, предложил Лаплас. В основе метода лежит свойство сжимаемости газа, т.е. изменение градиента плотности $\bar{p}(x, y, z, t)$ и, соответственно, объема $V(t)$ под действием градиента давления $\bar{p}(x, y, z, t)$, т.о. $\bar{p}(x, y, z, t) = f[\bar{p}(x, y, z, t)]$. Метод основывается на отношении длины волны звуковых сигналов к длине свободного пробега молекул воздуха и предполагает, что термодинамические процессы в звуковой волне описываются законом адиабаты, т.е. $pV^\gamma = \text{const}$, где γ – показатель адиабаты газа канала передачи энергии. Считается, что потенциальная энергия разности температур $E(\Delta\bar{T}^0)$, где $\Delta\bar{T}^0$ – градиент температуры между зонами давления и разрежения звуковой волны мала и не оказывает существенного влияния на процессы передачи энергии. Процесс распространения градиента давления $\bar{p}(x, y, z, t)$ осуществляется путем передачи энергии молекул газа из области давления в область разрежения вдоль оси x канала распространения энергии звука механизмом последовательной передачи объемного импульса $\bar{K}(x, t)$ с объёмной скоростью $\langle v_s \rangle$

$$\bar{K}(x, t) = m\langle \bar{v}_s \rangle, \quad (1)$$

где m – масса единичного объёма вещества канала передачи энергии.

Динамика движения энергии звука в газе предполагает, что физические процессы, происходящие в единичном объёме вещества канала передачи, обладают следующими свойствами.

1. Смещение молекул $l(x, t)$ по оси распространения энергии звука определяет плотность $\rho(x, t) = f[l(x, t)]$ вещества канала передачи энергии.
2. При изменении плотности изменяется давление $p(x, t) = f[\rho(x, t)]$.
3. Неравномерное распределение давления вызывает движение газа.

С учетом этих свойств выводится волновое уравнение:

$$\frac{\partial^2 l(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\langle v_s \rangle^2} \frac{\partial^2 l(x, t)}{\partial t^2}, \quad (2)$$

которое описывает процесс распространения звука в газовых средах. Был сделан вывод, что скорость звука определяется выражением:

$$\langle v_s \rangle^2 = \frac{dp(x, t)}{d\rho_s(x, t)}, \quad (3)$$

где $\rho_s(x, t)$ – плотность газа, содержащего энергию $E(t)$. Она связана со средней квадратичной скоростью молекул $\langle v \rangle$ газа коэффициентом $\gamma/3$, определяемым адиабатической постоянной

$$\langle v_s \rangle^2 = \frac{\gamma}{3} \langle v \rangle^2. \quad (4)$$

С учетом того, что значение адиабатического коэффициента находится в интервале $1 < \gamma < 2$, традиционная модель доказывает, что осреднённая скорость звука меньше средней квадратичной скорости молекул. Этот факт *противоречит* принципам Ферма [10] о минимизации времени переноса энергии и Гамильтона [9] наименьшего действия.

2.2 Развитие традиционной модели анализа объёмной скорости звука [6]. Основываясь на очевидном факте переноса энергии $E(t)$ акустическими сигналами, проведем второе приближение, заключающееся в анализе отношения $\frac{\langle v_x \rangle}{\langle v \rangle}$, где $\langle v_x \rangle$ – скорость передачи импульса молекулы газа по оси x канала передачи энергии.

В соответствии с первым началом термодинамики, термодинамический потенциал (внутренняя энергия) $E(t)$ вещества, передающего энергию $E_s(t)$ методом переноса импульса $\bar{K} = m_m \bar{v}$ элементарных носителей, определяется суммой $E(t) = E_s(t) + E_0(t)$, где $E_0(t)$ – внутренняя энергия стохастического движения носителей «пустого» канала передачи энергии при температуре T_0^0 . Предположим, что энергия $E_s(t)$ постоянна на некотором интервале времени t . Следуя Фейнману [9, с. 164], который доказал (4), представим массу единичного объёма V газа, переносящего энергию $E_s(t)$ как $m = \rho_s(x, t)V$, получим:

$$E = \frac{\rho_s(x, t)V\langle v_s \rangle^2}{2} > \frac{\rho_0(x, t)V\langle v^2 \rangle}{2}, \quad (5)$$

где: $\rho_0(x, t)$ – плотность единичного объёма вещества канала без энергии $E(t) = \frac{\rho_0(x, t)V\langle v \rangle^2}{2}$.

В (5) подставим (4), получим:

$$\rho_s(x, t)V\left(\frac{\gamma}{3}\right)\langle v \rangle^2 > \rho_0(x, t)V\langle v \rangle^2. \quad (6)$$

Можно сделать вывод, что в процессе введения энергии $E(t)$ в канал передачи, для параметра плотности его вещества должно соблюдаться неравенство:

$$\rho_s(x, t) > \frac{3}{\gamma} \rho_0(x, t). \quad (7)$$

Анализ (3 – 7) позволяет сделать вывод о факте *скачкообразного* изменения параметра плотности $\rho(x, t)$ на величину коэффициента $\frac{3}{\gamma}$, при введении в канал связи *любого количества* энергии $E(t)$. Данное утверждение адекватно следующему: происходит скачкообразное *уменьшение теплоемкости* на величину $\frac{3}{\gamma} \approx 2,5$ и *увеличение скорости* переноса некоторой части энергии (*теплопроводности*) до скорости звука $\langle v_s \rangle$ при температуре T_0^0 .

Проведем анализ изменения энергии молекулы газа (при $T^0 = \text{const}$), передающей импульс $\vec{K}(x, \Delta t_s) = m_m \langle \vec{v}_s \rangle(x, \Delta t_s)$, где: Δt_s – время свободного пробега молекулы газа по оси x канала связи, $\langle \vec{v}_s \rangle$ – дополнительно введенная энергией $E(t)$ скорость, осреднённая на интервале времени Δt_s . Заметим, что сама постановка этой задачи содержит внутреннее *противоречие традиционной модели*, т.к. увеличение скорости на $\langle \vec{v}_s \rangle$ даёт суммарную скорость молекул по оси x равную $\langle \vec{v}_s \rangle + \langle \vec{v} \rangle$, что влечёт увеличение температуры T^0 вещества канала связи, а это противоречит как положениям Лапласа о постоянстве теплового потенциала, так и фактам экспериментальных исследований.

В соответствии с законом равномерного распределения энергии по степеням свободы, на каждую степень (по осям x, y, z) приходится энергия равная $\frac{1}{2} kT^0$. По аналогии с анализом, проведенным Фейнманом [9, с. 162], запишем выражение (3) для скорости звука в единичном объеме V канала передачи $\langle v_{sx} \rangle^2 = \frac{\gamma p(x, t)V}{\rho_s(x, t)V}$. С учетом того, что $p(x, t)V = NkT^0$, где N – количество молекул газа, вовлеченных в процесс передачи энергии сигнала, $\rho_s(x, t)V = Nm_m$ – масса газа, получим $\langle v_{sx} \rangle^2 = \frac{\gamma NkT^0}{Nm_m} = \frac{\gamma kT^0}{m_m}$. Откуда следует, что энергия молекулы E_m , которая переносит энергию сигнала вдоль оси x канала связи, определяется как:

$$\begin{aligned} E_m &= \frac{m_m v_{sx}^2}{2} = \frac{\gamma}{2} kT^0, \\ 2 > \gamma > 1, \\ \frac{3}{2} kT^0 > E_m > \frac{1}{2} kT^0 \end{aligned} \quad (8)$$

и опять-таки содержит *противоречие*, т.к. предполагает уменьшение температуры T^0 единичного объе-

ма канала связи, что влечет за собой уменьшение скорости $\langle v \rangle$, либо изменение распределения энергии по дробному количеству степеней свободы. Фактически наблюдаем постоянство температуры, т.о. необходимо анализировать процесс изменения параметра количества степеней свободы, целочисленное изменение которого поясняется [8] изменением *энергии* единичного объёма вещества. Можно сделать *вывод*, что введение энергии в акустический канал передачи изменит количество степеней свободы некоторой совокупности молекул, переносящих энергию сигнала. Этот процесс можно определить как непрерывное изменение параметра порядка.

2.3. *Промежуточные выводы.* Механизм непрерывного изменения параметра порядка (8) поясняют базовые положения синергетики [12] и теория Л.Д. Ландау [2], основываясь на которых можно предложить модель следующего термодинамического процесса.

1 Процесс передачи энергии $E_s(t, \Delta t) = \text{const}$, $t \in [\Delta t]$ инициирует синергетический *эндотермический фазовый переход второго рода*, изменяющий параметры движения совокупности молекул некоторой массы m (определяющей энергию $E_s(t, \Delta t)$) вещества канала передачи по осям x, y и z . Этот процесс объединяет («совместное действие» в терминах синергизма) две степени свободы (y, z) векторов скоростей $\langle \vec{v}_{x,y,z} \rangle$ теплового движения таким образом, что молекулы, изменяя свой момент инерции (параметр порядка), начинают передавать *момент импульса* $\langle \vec{M}_m(x, y, z) \rangle = m_m \langle \vec{v} \rangle \langle \vec{r} \rangle$ *по спиральной траектории* радиуса $\langle r \rangle$ *в направлении градиента потенциальной энергии* давления $\vec{p}(x, \Delta t)$. Векторы импульса $\vec{K}(y, z)$ в плоскости y, z объединяются в один вектор момента импульса $\vec{M}_{y,z}(\omega_x, r, t)$, который вращается с круговой частотой $\langle \vec{\omega}_x \rangle$ (линейной скоростью $\langle \vec{v}_{y,z} \rangle$), определяя *энергию вращательного движения* $E_\omega(t, \Delta t)$ *цилиндра*, радиуса $\langle r \rangle$ с массой m и моментом инерции J_x .

2 Изменение количества степеней свободы молекулы вещества канала передачи происходит в результате непрерывного процесса изменения координат траекторий движения электронов. Изменение траекторий приводит к уменьшению количества степеней свободы и изменению *параметра порядка* молекулы: с точки на ось симметрии.

3 Скорость звука $\langle \vec{v}_s \rangle = \langle \vec{v}_x \rangle$, определяемая в соответствии с выражением (3), определяет энергию

$E_v(t, \Delta t)$ поступательного движения импульса $\vec{K}(x, \Delta t)$, является групповой скоростью волнового пакета, внутри которого существуют энергетические процессы вращательного движения, определяемые в плоскости осей y, z .

4 Объединяющим энергетическим параметром волнового пакета является скорость переноса импульса $\vec{K}_{x,y,z}(m, \langle \vec{v} \rangle, t)$, которая постоянна (при $T^0 = \text{const}$) и, в соответствии с принципом Ферма, должна соответствовать средней квадратичной скорости молекул $\langle \vec{v} \rangle$ вещества канала передачи.

5 Для каждого газа теплоёмкость (объемная плотность потока энергии) на интервале времени Δt постоянна, определяется адиабатической постоянной $\gamma(t, \Delta t)$. Тепловая проводимость, определяется максимальной скоростью v переноса энергии в канале передачи. **Исследованные процессы адекватны процессам перехода вещества в сверхпроводящее состояние, это позволяет обобщить теорию горения [1, 3, 4] на базе работ Л.Д. Ландау [2, 12] и применить ранее полученные результаты при анализе процессов в камере сгорания ГТД.**

6 Получены обобщающие выражения закона сохранения энергии:

$$\begin{aligned} \langle E(t, \Delta t) \rangle &= \text{const}, t \in [\Delta t], \\ \langle E \rangle &= \langle E_{v_x}(t, \Delta t) \rangle + \langle E_{\omega_{y,z}}(t, \Delta t) \rangle, \\ 0.5 \langle E_{v_x}(t, \Delta t) \rangle &= m \langle v_x(t, \Delta t) \rangle^2, \\ 0.5 \langle E_{\omega_{y,z}}(t, \Delta t) \rangle &= J_x(t, \Delta t) \langle \omega_x(t, \Delta t) \rangle^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Закона распределения энергии по степеням свободы:

$$\begin{aligned} \langle E_v(t, \Delta t) \rangle &= \langle E_\omega(t, \Delta t) \rangle = 0,5 \langle E(t, \Delta t) \rangle, \\ \langle \vec{v}_x(t, \Delta t) \rangle &= \text{const}, \\ \langle \vec{\omega}_x(t, \Delta t) \rangle &= \text{const}, \\ \langle \vec{v}(t, \Delta t) \rangle &= \langle \vec{v}_x(t, \Delta t) \rangle + \langle \vec{v}_{y,z}(t, \Delta t) \rangle, \\ \langle \vec{v}_{y,z}(t, \Delta t) \rangle &= \langle \vec{\omega}_x(t, \Delta t) \rangle \langle r_{tr}(t, \Delta t) \rangle. \end{aligned} \quad (10)$$

Условия формирования векторов скоростей молекул:

$$\begin{aligned} \varphi_v(t, \Delta t) &= \arccos \left[\frac{1}{\gamma(t, \Delta t)} \right], \\ \vec{v}_x(t, \Delta t) &= \vec{v}(t, \Delta t) \cos[\varphi_v(t, \Delta t)], \\ \vec{v}_{y,z}(t, \Delta t) &= \vec{v}(t, \Delta t) \sin[\varphi_v(t, \Delta t)], \end{aligned} \quad (11)$$

где $\varphi_v(t, \Delta t)$ – угол между векторами $\vec{v}_x(t, \Delta t)$ и $\vec{v}(t, \Delta t)$ скоростей движения молекул вещества канала передачи, $\vec{v}_{y,z}(t, \Delta t)$ – линейная скорость молекул.

Таким образом, в процессе изменения энергии (8) некоторого объема вещества канала, обладающего некоторым импульсом $\vec{K}(x, \Delta t) = m_m \langle \vec{v} \rangle(x, \Delta t)$, в соответствии со вторым законом Ньютона, происходит фазовый переход второго рода (9). В результате непрерывного процесса изменения координат плотности электронов внутри молекул происходит изменение параметра порядка с точки на ось симметрии с одновременным уменьшением количества степеней свободы. Процесс изменения параметра порядка вызывает изменение свойств вещества, в частности тепловой проводимости (11) и теплоёмкости. Направление вектора плотности потока энергии (9) определяется по градиенту потенциальной энергии давления в соответствии с правилом правого винта. Предложенная модель не противоречит принципу Ферма о минимизации времени переноса энергии и Гамильтона наименьшего действия.

2.4. Доказательство предложенной модели, связь с ранее проведенными фундаментальными исследованиями и природными процессами по критерию «внешнего оправдания».

2.4.1. Для поэтапного доказательства проведём расчет погрешности определения групповой (скорости звука) $\langle \vec{v}_x \rangle$ и фазовой $\langle \vec{v} \rangle$ скорости (7) движения молекул двухатомных газов состава воздуха (азот – 78%, кислород – 21%, остальные – 1%). Результаты расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчёта групповой и фазовой скорости молекул воздуха

	Газ	$\langle \vec{v} \rangle, \text{м/с}$ [16]	$\langle \vec{v}_s \rangle, \text{м/с}$ $T^0 = 300 \text{ К}$ $p = 101,3 \text{кПа}$	γ $T^0 = 300 \text{ К},$ $p = 101,3 \text{кПа}$	$\langle \vec{v}_x \rangle = \langle \vec{v} \rangle \cos \varphi_v,$ м/с	Погрешность, %
1	Водород, H ₂	1838	1303	1,405	1308	+0,38
2	Азот, N ₂	493	349	1,401	352	+0,86
3	Кислород, O ₂	461	329,7	1,396	330	+0,09

Значение погрешности расчёта ($<1\%$) позволяет допустить адекватность предложенной теории для двухатомных газов и применить выражения (9 – 11) для синтеза модели движения энергии газа в камере сгорания ГТД. Уход погрешности расчёта в положительные значения можно пояснить неточностью определения значения среднего квадрата скорости $\langle \bar{v} \rangle$ (неизвестны температура и давление) и использованием данных из разных источников информации. Расчёт показывает, что основной вклад в скоростную составляющую энергии вносит азот и кислород, преобладающие в процентном составе воздуха и молекулярной массе.

2.4.2 Результаты экспериментальных исследований вибраций горизонтального датчика заднего редуктора одного из двигателей показывают (рис. 1), что на поверхности корпуса определяются кратковременные ($t \approx 0,3\text{с}$) виброудары с параметром виброускорения до $(200 - 300)\text{g}$, что характерно для кратковременных детонационных процессов. Функции вибраций коррелированы с функцией изменения давления на рабочих форсунках, которые имеют импульсно-экспоненциальный характер (рис. 2).

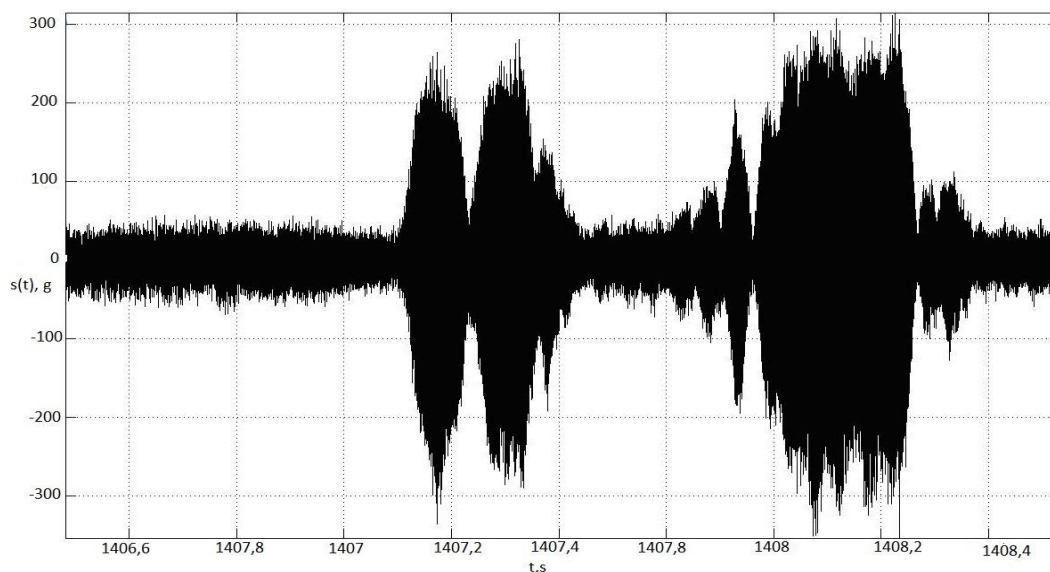


Рис. 1. Детализированный по времени (в окрестности 1407 с.) график функции вибраций горизонтального датчика заднего редуктора

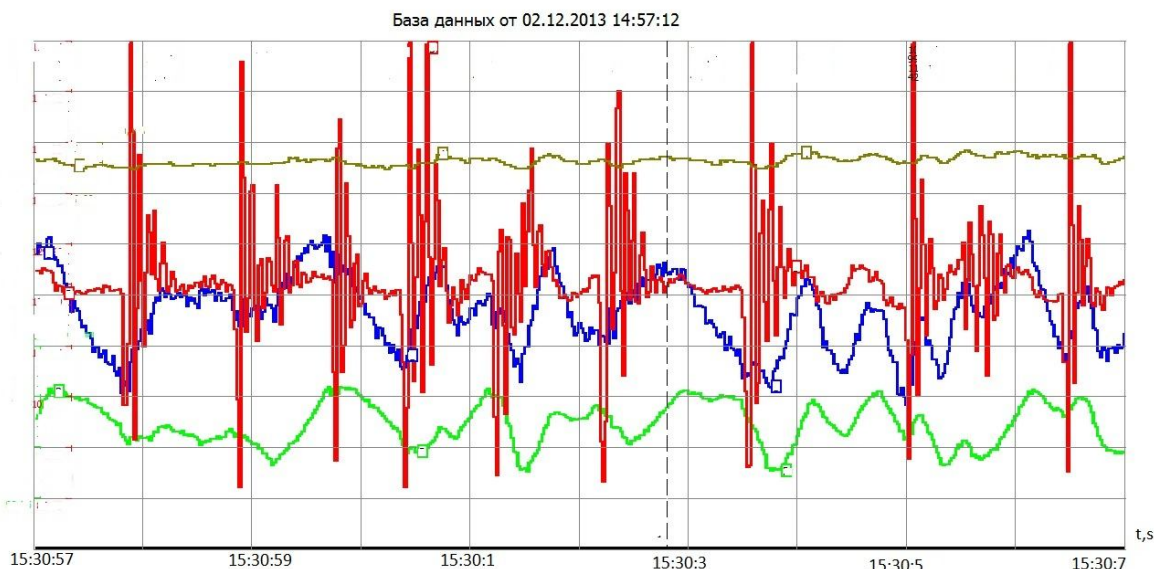


Рис. 2. Графики изменения расхода топлива

2.4.3. В монографии Я. Б. Зельдовича [3], посвященной фундаментальным исследованиям процесса детонации, показано, что скорость детонационной волны имеет порядок скорости звука «или, что то же самое, порядок тепловой скорости молекул» [3, С. 9].

2.4.4. В монографии Л. Н. Хитрина [1], посвященной фундаментальным исследованиям процесса горения и взрыва, анализируется процесс «спиновой детонации», для которой характерно, что «величины скоростей распространения детонации по своему порядку очень близки к средним скоростям теплового движения молекул в только что сгоревшем и еще накалённом газе» [1, С. 261]. Там же приводится очень важное, для камеры сгорания ГТД, выражение для величины параметра преддетонационного периода [1, С. 287].

2.4.5. Теория фазовых переходов второго рода достаточно подробно рассмотрена в фундаментальных работах Л. Д. Ландау [12]. Описанные процессы характерны, в частности, для сверхпроводников [13], у которых коэффициент изменения теплопроводности скачком увеличивается в 2,5...3 раза, что определено выражением (7). В дальнейшем, при решении прикладной задачи исследования спектра и энергии звука в процессе работы камеры сгорания газотурбинного двигателя, будут интересны формализованные процессы флуктуаций параметра порядка [12, С.513], в частности – вероятность w флуктуаций $\Delta\Phi_p$ при постоянных параметрах давления

P и температуры T^0 :

$$w \approx \exp(\Delta E_s / T^0),$$

$$\Delta\Phi_p = \frac{1}{2}(\eta - \bar{\eta})^2 \left(\frac{\partial^2 E_s}{\partial \eta^2} \right)_{P, T^0}, \quad (12)$$

где E_s – термодинамический потенциал объема канала передачи энергии, $\bar{\eta}$ – равновесное значение изменяемого параметра.

Средний квадрат флуктуаций в единичном объеме V :

$$\langle (\Delta\eta)^2 \rangle = \frac{T_c^0 \chi}{V}, \quad (13)$$

где χ – восприимчивость вещества при температуре T_c^0 .

Откуда следует, что вероятность флуктуаций пропорциональна экспоненте от термодинамического потенциала (12), скачок которого определяется квадратом разности значений изменяемого параметра и восприимчивостью вещества (13).

Выводы

Учитывая результаты ранее проведенных экспериментальных исследований, кратко изложенные в п.п. 2.4.2 – 2.4.5, считаем, что аналитическими, расчетными и экспериментальными [6] методами доказательство гипотезы по критерию «внешнего оправдания» проведено. В дополнение к **промежуточным выводам** (п. 2.3) можно добавить, что предложенная феноменологическая модель второго приближения поясняет некоторые противоречия традиционных теорий горения и распространения звука, и, естественно, не является окончательной, т.к. в данной работе не раскрыты вопросы: механизма внутримпульсной модуляции энергии на интервале Δt и законы её диссипации в канале распространения. Для решения этих задач необходимо искать третье приближение, объектом исследования которого должны быть функциональные зависимости параметров энергии (9 – 11) внутри интервала $\langle \dots \rangle$ осреднения, т.е. погрешности адекватности гипотезы свойства стационарности критерия приближения $\frac{\langle v_x \rangle}{\langle v \rangle}$ внутри интервала времени Δt .

Предложенный подход по существу соответствует общепринятому в полуэмпирической теории турбулентности. Применяя его к предмету исследований, логично, на этом этапе приближений, положить достаточность параметра адекватности предложенной модели, основанной на выводах, полученных косвенным методом.

Литература

1. Хитрин, Л. Н. Физика горения и взрыва. [Текст] / Л. Н. Хитрин. – М.: Изд-во Московского ун-ва, 1957. – 442 с.
2. Ландау, Л. Д. Гидродинамика (Серия «Теоретическая физика», Т. 6). [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц – М.: Изд-во «Физ.-мат. лит.», 1999. – 732 с.
3. Зельдович, Я. Б. Теория детонации [Текст] / Я. Б. Зельдович, А. С. Компанеев. – М.: Изд-во технико-теоретической литературы, 1955. – 270 с.
4. Теория ударных волн и введение в газодинамику. [Текст] / Я. Б. Зельдович, Г. И. Беренблатт, В. Б. Либрович [и др.]. – М.: Наука, 1980. – 478 с.
5. Ефимов, В. Б. Нелинейные волны второго звука и акустическая турбулентность в сверхтекучем гелии [Электронный ресурс]: дисс. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.07 / Ефимов Виктор Борисович. – Черноголовка, РФ, 2011. – 231 с. – Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/nelineinye-volny-vtorogo-zvuka-i-akusticheskaya-turbulentnost-v-sverkhtekuchem-gelii>. – 03.06.2013.

6. Журавлёв, В. Н. Синергетический процесс передачи энергии речевого сигнала [Текст] / В. Н. Журавлёв // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. – К., 2010. – № 1(20). – С. 29 – 42.

7. Кузнецов, В. Г. Основы теории относительности и квантовой механики в их историческом развитии. [Текст] / В. Г. Кузнецов – М. : УРСС, 2007. – 266 с.

8. Кузьмичёв, В. Е. Законы и формулы физики [Текст] / В. Е. Кузьмичёв. – К. : Наук. думка, 1989. – 864 с.

9. Фейнман, Р. Фейнмановские лекции по физике. Кинетика. Теплота. Звук [Текст] / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. – М. : Мир, 1965. – Т. 4, Вып. 4. – 260 с.

10. Фейнман, Р. Фейнмановские лекции по физике. Излучение. Волны. Кванты [Текст] / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. – М. : Мир, 1965. – Т. 3, Вып. 3. – 238 с.

11. Николис, Г. Самоорганизация в неравновесных системах [Текст] / Г. Николис, И. Пригожин. – М. : Мир, 1979. – 512 с.

12. Ландау, Л. Д. Статистическая физика (Сер. Теоретическая физика, Т. 5). [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Изд-во Физ.-мат. лит., 1976. – 584 с.

13. Гинзбург, В. Л. Сверхпроводимость. [Текст] / В. Л. Гинзбург, Е. А. Андрюшин. – М. : Педагогика, 1990. – 112 с.

Поступила в редакцию 14.05.2015, рассмотрена на редколлегии 19.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. информационных технологий и систем А. И. Михалёв, Национальная металлургическая академия Украины, Днепрпетровск.

ФЕНОМЕНОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИПРОМІНЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ ЗВУКУ В ПРОЦЕСІ ГОРІННЯ

В. М. Журавльов

Для пояснення неповної адекватності гіпотез процесу звукового випромінювання енергії в процесі горіння палив запропоновано феноменологічні фізична й математична моделі фазового переходу другого роду в газових сумішах, що пояснюють властивість, надпровідності для потоку енергії. Показаний процес утвору детонаційних вихрових структур у процесі зміни термодинамічного потенціалу, який ініціює плавна зміна параметра порядку молекул і стрибкоподібна зміна параметрів теплоємності й теплопровідності газових сумішей. Проведено теоретичні й розрахункові дослідження, що доводять адекватність запропонованих моделей фізичним процесам.

Ключові слова: енергія, параметр порядку, фазовий перехід, вихровий потік, швидкість звуку.

PHENOMENOLOGICAL MODEL OF PROCESS OF RADIATION OF ENERGY OF THE SOUND IN THE COURSE OF DETONATION COMBUSTION

V. N. Zhuravlev

For the explanatory of incomplete adequacy of hypotheses of process of sound radiation of energy in the course of combustion топлив phenomenological physical and mathematical models of phase transformation of the second sort in the gas mixtures, explaining property of their superconductivity for an energy stream are offered. Process of formation of detonation vortex structures in the course of change of a thermodynamic potential which initiates the smooth change of an order parameter of molecules and the abrupt change of parameters of heat capacity and thermal conductivity of gas mixtures is shown. The theoretical and settlement examinations proving adequacy of offered models to physical processes are carried out.

Keywords: Energy, an order parameter, phase transformation, a vortex flow, velocity of a sound.

Журавльов Владимир Николаевич – д-р техн. наук, зам. нач. управления информационных технологий ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: ws50@i.ua.