

УДК 629.735.45:621.833(031)

В. Н. ЖУРАВЛЁВ, В. И. ПИСЬМЕННЫЙ

ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

ПРОЦЕССЫ САМООРГАНИЗАЦИИ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ЗАДАЧЕ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПРЕССОРА ГТД

Предложена укрупнённая микро- и макроскопическая модель процессов ламинарного и стационарно неравновесного турбулентного движения газа, включающая в себя каскадные кооперативные процессы энергетической самоорганизации молекул. Модель основана на законе сохранения энергии с учётом того, что излучение и поглощение энергии происходит в процессе фазовых переходов. В результате первого процесса самоорганизации, путём преодоления динамической вязкости процесса ламинарного движения, потенциальная энергия термодинамического потенциала разности скоростей слоёв газа преобразовывается, в результате неравновесного фазового перехода на микроуровне, во вращательное движение молекул газа. При достижении критического параметра теплопроводности (плотности потока энергии), инициируется второй процесс фазовой самоорганизации, приводящий к образованию макроскопической динамической спирально-вихревой структуры.

Ключевые слова: компрессор, энергия, турбулентный вихрь, самоорганизация, неравновесный фазовый переход.

1. Актуальность. Постановка задачи

Турбулентность принадлежит к числу наиболее сложных природных явлений, связанных с возникновением и развитием организованных диссипативных турбулентных структур при определенных режимах течения воздуха, в частности, в компрессоре газотурбинного двигателя (ГТД), который можно определить как неравновесную открытую систему. Несмотря на успехи в теоретических и экспериментальных исследованиях [1, 2] этого природного процесса, многие функциональные зависимости основных термодинамических параметров остаются неисследованными. В частности: параметры потока газа в межлопаточном пространстве компрессора, приводящие к вращающемуся срыву; условия возникновения, развития, время жизни турбулентного вихря; условия его деградации и разрушения (помпажа).

Согласно традиционным представлениям, турбулентность является процессом хаотическим. Однако существует и иная точка зрения на турбулентность, высказанная впервые И. Пригожиным [3] и доказанная Ю.Л. Климонтовичем [4]. Согласно ей, переход от ламинарного течения к турбулентному является процессом самоорганизации, при котором часть энергии теплового хаоса (связанного с произвольными флуктуациями, происходящими на молекулярном уровне) переходит в энергию связей микро- и макроскопически организованного движения упорядоченных структур. Эти процессы повышают

внутреннюю упорядоченность системы по сравнению с молекулярным хаосом. В частности, каскадный процесс образования вихрей, имеющий место в развитой турбулентности, можно трактовать как *последовательность энергетических процессов самоорганизации*. При этом множество пространственно-временных масштабов, в которых проходит этот процесс, соответствует когерентному поведению молекул среды, выражающемуся в форме подобной супермолекулярной организации, в которой молекулы участвуют в коллективных, когерентных, взаимозависимых, вращательных движениях.

Актуальность предлагаемой работы определяется тем, что хотя со времени понимания синергетической природы турбулентности, как процесса самоорганизации, прошло уже около тридцати лет, однако до сих пор представления о возникающих в потоке когерентных структурах не материализовались в разработки модельных подходов, направленных на создание практических инженерных методов анализа турбулентности, традиционно основанных на осредненных газодинамических уравнениях [4].

Таким образом, **цель данной работы:** предложить к обсуждению укрупнённую феноменологическую микро- и макроскопическую модель стационарно- неравновесной турбулентности с учетом происходящих в ней нелинейных кооперативных энергетических процессов самоорганизации.

Для эффективной реализации аналитических исследований необходимо определить основное противоречие современной теории и практики анализа природного процесса турбулизации. Оно, в

соответствии с современной методологией анализа функционирования природных объектов, заключается в традиционном детерминистическом подходе, информационная неадекватность которого доказана многочисленными подходами к созданию математических и феноменологических моделей турбулентных течений. В 1986 г. сэр Джеймс Лайтхилл, ставший позже президентом Международного союза чистой и прикладной математики, сделал заявление [5]. Он извинился от имени своих коллег за то, что «...в течение трех веков образованная публика вводилась в заблуждение апологией детерминизма, основанного на системе Ньютона, тогда как можно считать доказанным, по крайней мере, с 1960 года, что этот детерминизм является ошибочной позицией». В настоящее время доказано [6], что энергоинформационное функционирование эволюционирующих природных объектов определяется нелинейными стохастическими пространственно-временными диссипативными процессами.

На базе первого начала термодинамики, с учётом того, что излучение и поглощение энергии $E(t)$ происходит в процессе фазовых переходов, был определён метод исследований, который основан на утверждении [4], что нелинейные пространственно-временные преобразования в стационарно-неравновесной турбулентности возникают в результате последовательности кооперативных механизмов самоорганизации и обмена энергией в процессе микро- и макроскопических неравновесных фазовых переходов.

2. Аналитическая модель энергетического обмена в потоке газа

Рассмотрим классическую задачу течения газа по трубе круглого сечения с гладкими стенками. При ламинарном движении скорость в сечении трубы изменяется по параболическому закону Пуазейля:

$$v(r) = v_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right), \quad (1)$$

где R – радиус трубы, v_0 – скорость газа на оси трубы $v_0 = \frac{P_1 - P_2}{4\eta l} R^2$, $E_0 = (P_1 - P_2) = \text{const}$ – термодинамический потенциал разности давлений на концах трубы, l – длина трубы, η – динамическая вязкость газа.

2.1. Ламинарное движение газа

Рассмотрим физический смысл параметра динамической вязкости. Классически вязкость опреде-

ляется как параметр, характеризующий внутреннее трение и единицей вязкости в системе СИ является паскаль на секунду. Преобразуем размерность динамической вязкости таким образом, чтобы выявить энергетические зависимости:

$$\begin{aligned} [\text{Па} \times \text{с}] &= \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \times \text{с} \right] = \left[\frac{\text{кг} \times \text{м}}{\text{с}^2} \times \frac{\text{с}}{\text{м}^2} \times \frac{\text{м}}{\text{м}} \right] = \\ &= \left[\frac{\text{кг} \times \text{м}}{\text{с}^2} \times \frac{1}{\text{м}^2} \times \frac{\text{с}}{\text{м}} \right] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \times \frac{1}{\text{в}} \right]. \end{aligned}$$

Получаем, что энергетический параметр динамической вязкости η^E (с верхним индексом E) можно определить как процесс поглощения энергии E , на единице площади потока S (плотность потока энергии \vec{E}_S – вектор Умова), параллельной вектору скорости \vec{v} , приходящуюся на единицу приращения мгновенной скорости \vec{v} движения газа:

$$\eta^E = \left. \frac{\partial \vec{E}_S}{\partial \vec{v}} \right|_{\Delta t \rightarrow 0}, \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \times \frac{1}{\text{в}} \right]. \quad (2)$$

Вязкость, в энергетическом смысле, можно определить как параметр удельного поглощения энергии термодинамического потенциала E_0 при изменении скорости (1) движения газа. Например [7], для азота, при температуре $T = 20^\circ\text{C}$ и давлении $P = 101,3 \text{ кПа}$, динамическая вязкость будет равна $\eta^E = 0,0175 \left[\frac{\text{Дж} / \text{м}^2}{\text{м} / \text{с}} \right]$. Это означает, что при увеличении скорости потока на образующей цилиндра осевого сечения трубы на $v = 1 \text{ [м/с]}$ плотность потока энергии $E_S \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \right]$ поглощения термодинамического потенциала $E_0 [\text{Дж}]$ во внутреннюю энергию молекул газа на каждом м^2 цилиндра будет увеличиваться на $\Delta E_S = 0,0175 \text{ Дж}$. С учётом (1) следует, что максимальная плотность потока (2) энергии $\Delta E_S = \eta^E \Delta v$ будет возле стенки трубы.

Возникает естественный вопрос о фазовых процессах [4], в результате которых происходит поглощение энергии. Мы уже рассматривали эту задачу при определении скорости звука в газовых средах [8]. Дополним построение микроскопической модели молекулы газа анализом происходящих в ней нелинейных кооперативных процессов самоорганизации.

Энергетический анализ. Основываясь на очевидном факте поглощении энергии E_0 молекулами газа в трубе, что поясняется фактом динамической

вязкости, проведем приближение, заключающееся в анализе отношения $\frac{\langle v_x \rangle}{\langle v \rangle}$, где $\langle v_x \rangle$ – скорость передачи момента импульса молекулы газа по оси x канала передачи энергии, $\langle v \rangle$ – средняя квадратичная скорость молекул газа.

В соответствии с первым началом термодинамики, термодинамический потенциал (внутренняя энергия) $E_1(t)$ вещества, передающего энергию E_0 методом переноса импульса $\vec{K} = m_m \vec{v}$ элементарных носителей, определяется суммой $E_0(t) = E_1(t) + E_{in}(t)$, где $E_{in}(t)$ – внутренняя энергия стохастического движения носителей «пустого» канала передачи энергии при температуре T_0^0 . Следуя Фейнману [9, с. 164], который доказал, что $\langle v_x \rangle^2 = \frac{\gamma}{3} \langle v_0 \rangle^2$, представим массу единичного объема V газа, переносящего энергию $E_1(t)$ как $m = \rho_1(x, t)V$, получим:

$$E_0 = \frac{\rho_1(x, t)V \langle v_1 \rangle^2}{2} > \frac{\rho_0(x, t)V \langle v^2 \rangle}{2}, \quad (3)$$

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

С учётом $\langle v_x \rangle^2 = \frac{\gamma}{3} \langle v_0 \rangle^2$, получим:

$$\rho_1(x, t)V \left(\frac{\gamma}{3} \right) \langle v \rangle^2 > \rho_0(x, t)V \langle v \rangle^2. \quad (4)$$

Можно сделать вывод, что в процессе введения энергии $E_0(t)$ в канал передачи, для параметра плотности его вещества должно соблюдаться неравенство:

$$\rho_1(x, t) > \frac{3}{\gamma} \rho_0(x, t). \quad (5)$$

Анализ (3) – (5) позволяет сделать вывод о факте скачкообразного изменения параметра плотности $\rho(x, t)$ на величину коэффициента $\frac{3}{\gamma}$, при введении в канал энергии $E_0(t)$.

Проведем анализ изменения энергии молекулы газа (при $T^0 = \text{const}$), передающей импульс $\vec{K}(x, \Delta t) = m_m \langle \vec{v}_1 \rangle(x, \Delta t)$, где Δt – время свободного пробега молекулы газа по оси x канала, $\langle \vec{v}_1 \rangle$ – дополнительно введенная энергией $E_0(t)$ скорость,

осреднённая на интервале времени Δt_1 . Заметим, что сама постановка этой задачи содержит внутреннее противоречие традиционной модели, т.к. увеличение скорости на $\langle \vec{v}_1 \rangle$ даёт суммарную скорость молекул по оси x равную $\langle \vec{v}_1 \rangle + \langle \vec{v} \rangle$, что влечёт увеличение температуры T^0 вещества канала, а это противоречит как положениям Лапласа о постоянстве теплового потенциала, так и фактам экспериментальных исследований.

В соответствии с законом равнораспределения 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 в единичном объеме V канала передачи

$$\langle v_{1x} \rangle^2 = \frac{\gamma p(x, t)V}{\rho_1(x, t)V}. \quad \text{С учетом, что } p(x, t)V = NkT^0,$$

где N – количество молекул газа, вовлеченных в процесс передачи энергии термодинамического потенциала, $\rho_1(x, t)V = Nm_m$ – масса газа, получим

$$\langle v_{1x} \rangle^2 = \frac{\gamma NkT^0}{Nm_m} = \frac{\gamma kT^0}{m_m}.$$

Откуда следует, что энергия молекулы E_m , которая поглощает часть энергии E_0 , определяется как:

$$E_m = \frac{m_m v_{1x}^2}{2} = \frac{\gamma}{2} kT^0, \quad (6)$$

$$2 > \gamma > 1,$$

$$\frac{3}{2} kT^0 > E_m > \frac{1}{2} kT^0,$$

и, опять-таки, содержит противоречие, т.к. предполагает уменьшение температуры T^0 единичного объема канала, что влечет за собой уменьшение скорости $\langle v \rangle$, либо изменение распределения энергии по дробному количеству степеней свободы. Фактически мы наблюдаем постоянство температуры, т.о. необходимо анализировать процесс изменения параметра количества степеней свободы, целочисленное изменение которого поясняется изменением энергии единичного объема вещества. Можно сделать вывод, что введение энергии в объем газа в трубе изменит количество степеней свободы некоторой совокупности молекул, переносящих энергию термодинамического потенциала E_0 .

Процесс передачи энергии $E_0(t, \Delta t) = \text{const}$, $t \in [\Delta t]$ инициирует неравновесный микроуровневый фазовый переход, изменяющий параметры

движения молекул некоторой массы m (определяющей энергию $E_0(t, \Delta t)$) газа по осям x, y и z . Происходит процесс самоорганизации, который объединяет 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 $\langle \vec{M}_m(x, y, z) \rangle = m_m \langle \vec{v} \rangle \langle \vec{r} \rangle$ в направлении градиента термодинамического потенциала E_0 . Векторы импульса $\vec{K}(y, z)$ в плоскости y, z объединяются в один вектор момента импульса $\vec{M}_{y,z}(\omega_x, t)$, который вращается с круговой частотой $\langle \omega_x \rangle$ (линейной скоростью $\langle \vec{v}_{y,z} \rangle$), определяя энергию вращательного движения $E_\omega(t, \Delta t)$ молекулы. Изменение количества степеней свободы молекулы вещества канала передачи происходит в результате непрерывного процесса изменения координат траекторий движения электронов в соответствии с их ротационным числом. Изменение траекторий приводит к уменьшению количества степеней свободы и изменению параметра порядка молекулы: с точки на ось симметрии. Обобщающие выражения с учетом закона сохранения энергии и при равновероятном распределении энергии по степеням свободы:

$$\begin{aligned} \langle E_0(t, \Delta t) \rangle &= \text{const}, t \in [\Delta t], \\ \langle E_0(t, \Delta t) \rangle &= \langle E_{v_x}(t, \Delta t) \rangle + \langle E_{\omega_{y,z}}(t, \Delta t) \rangle, \\ 0,5 \langle E_{v_x}(t, \Delta t) \rangle &= m \langle v_x(t, \Delta t) \rangle^2, \\ 0,5 \langle E_{\omega_{y,z}}(t, \Delta t) \rangle &= J_x(t, \Delta t) \langle \omega_x(t, \Delta t) \rangle^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Количественный анализ энергии вращательного движения молекул газа. Вращение молекул рассмотрим в предположении жесткой связи между ядрами [7], т.е. пренебрегая колебаниями. Для двухатомной молекулы момент инерции относительно оси, перпендикулярной оси молекулы и проходящей через центр инерции, равен $I = 2M_{\text{пр}}R_0^2$, где $M_{\text{пр}}$ – приведённый момент, R_0 – радиус молекулы. Энергия вращательного движения связана с вращательным моментом количества движения молекулы \vec{M} : $E_\omega = \frac{\vec{M}^2}{2I}$. Вращательный момент квантуется $M = \hbar \sqrt{J(J+1)}$, где $J = 0, 1, 2, \dots$ – ротационное число, \hbar – постоянная Планка. Что позволяет определить вращательные уровни энергии:

$$E_\omega = \frac{\hbar^2}{2I} \sqrt{J(J+1)}, J = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

Для вращательного спектра разрешены переходы с $\Delta J = \pm 1$, т.е. возможно поглощение или испускание квантов с энергией $\Delta E_\omega = 2 \left(\frac{\hbar^2}{2I} \right)$.

Объединяющим энергетическим параметром 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 энергии.

Для каждого газа теплопроводность (объемная плотность потока энергии E_S) на интервале времени Δt постоянна и определяется адиабатической постоянной $\gamma(t, \Delta t)$. Условия формирования векторов угловых скоростей молекул:

$$\begin{aligned} \varphi_v(t, \Delta t) &= \arccos \left[\frac{1}{\gamma(t, \Delta t)} \right], \\ \vec{v}_x(t, \Delta t) &= \vec{v}(t, \Delta t) \cos[\varphi_v(t, \Delta t)], \\ \vec{v}_{y,z}(t, \Delta t) &= \vec{v}(t, \Delta t) \sin[\varphi_v(t, \Delta t)], \end{aligned} \quad (9)$$

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.

Доказательство предложенной модели, связь с ранее проведенными фундаментальными исследованиями и природными процессами приведено в [8].

Электромагнитные свойства молекулы после микроскопического неравновесного фазового перехода. В «пустом» канале молекула нейтральна и не имеет внешнего электрического и магнитного полей, которые компенсируются оболочкой из вращающихся по нейтральным орбитам электронов. После эндотермического фазового перехода (8) изменяются параметры орбит электронов в соответствии с ротационным числом, электромагнитная нейтральность нарушается и молекула приобретает свойство электромагнитного диполя с зарядом q_e . Напряженность электрического \vec{E}_e и индукция магнитного \vec{B} полей описываются уравнениями Максвелла, которые, в общем виде, можно рассматривать как электромагнитные уравнения термодинамики неравновесных процессов [10]:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{B} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}_e}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \vec{j}, \\ \operatorname{rot} \vec{E}_e &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{E}_e &= 4\pi q_e, \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где c – скорость света. Первое уравнение выражает закон Ампера с учётом тока смещения \vec{j} , второе – закон электромагнитной индукции, третье – закон Кулона, четвертое определяет вихревое магнитное поле без источника и стока. Электромагнитное поле характеризуется плотностью потока энергии $\vec{E}_S = \vec{E}_e \times \vec{B}$ – вектором Пойнтинга.

На молекулы, движущиеся в магнитном поле Земли, действует обобщенная сила Лоренца $\vec{F}_L = q_e \vec{E}_{\text{eex}} + q[\vec{v}_x \times \vec{B}_{\text{ex}}]$, где \vec{E}_{eex} и \vec{B}_{ex} – напряженность и индукция поля Земли, которая определяет спиральную траекторию их движения. Необходимо отметить, что при ламинарном движении газа (малом числе Рейнольдса) расстояния между «энергетическими» молекулами – диполями настолько велики, что силы, определяемые законом Кулона

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{e1}q_{e2}}{r_{12}^2},$$

малы и не оказывают существенного влияния на траектории движения. Направление векторов скоростей (9), электрического и магнитного полей (10) некогерентно, определяется потенциалами и полями внешней среды.

Электромагнитные свойства турбулентных вихрей вращающегося срыва косвенно подтверждаются положительными результатами экспериментальных исследований [11] влияния на устойчивость компрессора высоковольтным электрическим полем электродов плазменного актуатора, расположенных между статорными лопатками. Косвенными доказательствами электромагнитной природы процесса поглощения энергии трения являются факты электризации некоторых веществ, молниеобразование в облаках и следы электрической эрозии на роторных подшипниках ГТД.

Выводы по ламинарному движению.

1. В процессе преодоления динамической вязкости (2) энергия внешнего термодинамического потенциала преобразовывается, в результате микроскопического неравновесного фазового перехода, в энергию вращательного движения молекул (8). Силы Лоренца определяют спиральную траекторию их движения.

2. Энергия молекул (7), находящихся в неравновесном состоянии, определяется ротационным числом.

3. «Энергетические» молекулы приобретают свойства электромагнитного диполя с параметрами (10) и концентрируются в пристеночной области, где $\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right) \rightarrow \max$.

2.2. Газодинамическая неустойчивость и возникновение турбулентности

По мере увеличения термодинамического потенциала E_0 растёт скорость v_0 . Значение скорости в пристеночной области трубы v_1 и её градиента нас интересует в первую очередь, т.к. в этом объеме потока находится максимальная концентрация «энергетических» (7, 8) молекул – диполей, обладающих электромагнитным полем (10). Одновременно растёт число Рейнольдса $Re = \frac{\rho v_1 l}{\eta}$, где ρ – плотность газа $\left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right]$, l – длина трубы [м]. Преобразуем размерность числа Рейнольдса [5], по аналогии с динамической вязкостью, таким образом, чтобы выявить энергетическую зависимость:

$$\begin{aligned} \left[\frac{\left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right] \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right] \left[\text{м} \right]}{\left[\text{Па} \times \text{с} \right]} \right] &= \left[\frac{\left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right] \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right] \left[\text{м} \right]}{\left[\frac{\text{кг} \times \text{м}}{\text{с}^2} \frac{1}{\text{м}^2} \times \text{с} \right]} \right] = \\ &= \left[\frac{\left[\frac{\text{кг} \times \text{м}^2}{\text{с}^2} \right] \left[\frac{1}{\text{м}^3} \right] \left[\text{м} \right]}{\left[\frac{\text{кг} \times \text{м}}{\text{с}^2} \frac{1}{\text{м}^2} \right] \left[\text{м} \right]} \right] = \left[\frac{\left[\frac{\text{кг} \times \text{м}^2}{\text{с}^2} \right] \left[\frac{1}{\text{м}^2} \right]}{\left[\frac{\text{кг} \times \text{м}^2}{\text{с}^2} \right] \left[\frac{1}{\text{м}^2} \right]} \right]. \end{aligned}$$

Получаем, что энергетический параметр числа Рейнольдса (верхний индекс E) можно определить как отношение плотности потока энергии E_S газа, имеющего скорость v_1 к некоторой плотности энергии в невозмущенном газе, т.е. при $v = 0$:

$$Re^E = \frac{E_S|_{v=v_1}}{E_S|_{v=0}}. \quad (11)$$

Получили выражение (11), показывающее во сколько раз увеличивается плотность потока энергии в ламинарном потоке газа при увеличении скорости потока от нуля до v_1 .

Известно, что при достижении числа Рейнольдса критического значения $Re_{кр}^E$ начинается процесс турбулизации потока. Принимая во внимание гипотезу, предложенную для ламинарного потока, можно предположить, что в этот момент времени (при $Re^E = Re_{кр}^E$) достигается такая объёмная плотность «энергетических» молекул газа, при которой силы Кулона становятся равны (либо больше) силам инерции. «Энергетические» молекулы начинают образовывать пространственные структуры [10], в которых происходит макроскопический эндотермический неравновесный фазовый переход. Физическая причина возникновения такого перехода состоит в следующем.

При увеличении термодинамического потенциала E_0 увеличивается скорость потока газа, для этого необходима бóльшая пропускная способность по параметру плотности потока энергии E_S , чем та, которая может быть обеспечена геометрическими параметрами трубы и параметром теплопроводности. В пристеночном объеме потока большинство молекулы поглотили энергию (7), (8) термодинамического потенциала и приобрели свойства электромагнитного диполя (10). Для увеличения пропускной способности молекулы самоорганизуются путём эндотермического коллективного когерентного объединения электромагнитных полей (10), при котором возникает более упорядоченное спиральное движение – вихрь, перемещающийся в пристеночной области. Энергетическая ёмкость (плотность потока энергии) поступательного и спирально-вращательного движения вихревой структуры много больше ламинарной:

$$\begin{aligned} \langle E_W(t) \rangle &\neq \text{const}, \\ \langle E_W(t) \rangle &= \langle E_{v_x}(t) \rangle + \langle E_{\omega_{y,z}}(t) \rangle, \\ \langle E_{v_x}(t) \rangle &= m \langle v_x(t) \rangle^2, \\ \langle E_{\omega_{y,z}}(t) \rangle &= J_x(t) \langle \omega_x(t) \rangle^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Это выражается в том, что коэффициент вязкости (2) вихря развитой турбулентности больше соответствующего коэффициента при ламинарном движении газа.

Динамику роста, форму и устойчивость вихря определяет положительная обратная связь по внутреннему градиенту термодинамического потенциала и внутреннему электромагнитному полю:

$$\begin{aligned} \bar{E}_{W0}(t) &< \bar{E}_0(t), \\ \text{div} \bar{E}_e &< 0, \\ \text{div} \bar{B}_1 &< 0, \end{aligned} \quad (13)$$

которое является когерентной суперпозицией полей молекул (10). Уравнения (13) определяют, кроме механического, вихревые магнитное и электрическое поля, которые имеет сток внешнего поля, т.е. поглощают энергию внешнего термодинамического потенциала E_0 и описывают тенденцию расширения вихря. Внутренняя концентрация электромагнитной и механической энергии (12, 13) вихря создаёт внутренний градиент термодинамического потенциала $\bar{E}_{W0}(t) = E_0(t) - E_W(t)$. Вектор ротора $\text{rot} \bar{v}$ угловой скорости Ω_v вихря направлен по вектору суммы векторов градиентов внутреннего и внешнего термодинамического потенциалов и полей.

При вихревых экспериментальных исследованиях газа [12] (мольные концентрации $\alpha(N_2) = 0,8$ и $\alpha(O_2) = 0,2$) в случае высокого уровня турбулизации величина турбулентной вязкости на срезе сопла в ≈ 2500 раз превышала ламинарную вязкость, что одного порядка с критическим числом Рейнольдса, данный факт косвенно подтверждает выражения (11, 12). В случае низкого уровня турбулизации, при котором турбулентный поток много меньше ламинарного, вязкость (2) была в пять раз ниже ламинарной. Этот факт подтверждает большие энергетические свойства вихря, и определяет наличие на нагрузочной характеристике компрессора участка с отрицательным внутренним сопротивлением, т.н. S-образной характеристикой. Подобные вольтамперные характеристики имеют полупроводниковые приборы, в частности – тиристоры, диоды и туннельные диоды. Можно сделать вывод, что туннельный эффект отрицательного внутреннего сопротивления свойственен процессам с низким уровнем турбулизации носителей энергии в начале макроскопического коллективного когерентного объединения их электромагнитных полей. Можно полагать, что энергетическая эффективность ступени компрессора будет максимальной, если его рабочая точка будет находиться в «седле» S-образной характеристики.

В случае отрыва вихря от стенки, вязкость (2) уменьшается, при этом, учитывая закон сохранения импульса, увеличиваются скорости (12).

В связи с тем, что аналитическое представление турбулентного вихря общепризнанно является темой отдельных исследований, рассмотрим основные свойства, вытекающие из вышеприведенного анализа.

Выводы по турбулентному движению.

1. Вихрь – макроскопическая диссипативная динамическая структура, в которой концентрация электромагнитной и механической энергии вихря создаёт внутренний градиент термодинамического потенциала.

2. Форму и устойчивость вихря определяет внутренний градиент термодинамического потенциала и внутреннее электромагнитное поле (13), которые характеризуют его энергетические параметры и описывают тенденцию расширения вихря. Величина градиента определяет параметр скорости поглощения энергии и, соответственно, времени начала проявления помпажного состояния – достижения диаметра вихря размера межлопаточного пространства, выброса вихря в пространство статорных лопаток, его экзотермического разрушения и изменения параметров рабочей точки на S–характеристике компрессора.

3. Невыполнение неравенств (13) ведет к деградации вихря и его разрушению. В случае разрушения вихря по образующей, инициируется экзотермический фазовый процесс с почти мгновенным выделением поглощённой энергии в виде повышения давления (температуры), а также возникновением разности потенциалов аддитивного электрического поля молекул в точке разрыва.

Выводы

Предложена укрупнённая микро– и макроскопическая модель процессов ламинарного и стационарно неравновесного турбулентного механизма передачи энергии в газовых средах, основанная на каскадном кооперативном процессе энергетической самоорганизации молекул. Модель основана на законе сохранения энергии и с учётом того, что излучение и поглощение энергии происходит в процессе фазовых переходов.

В результате первого процесса самоорганизации, путём преодоления динамической вязкости процесса ламинарного движения (2) потенциальная энергия термодинамического потенциала разности скоростей слоёв газа преобразовывается, в результате неравновесного фазового перехода на микроуровне, в энергию вращательного движения молекул газа (8). Энергия молекул (7), находящихся в неравновесном состоянии, определяется ротационным числом. «Энергетические» молекулы приобретают свойства электромагнитного диполя с параметрами (10) и концентрируются на оси потока. Сила Лоренца определяет спиральную траекторию их движения.

При достижении критического параметра теплопроводности (плотности потока энергии), инициируется

второй процесс фазовой самоорганизации, приводящий к образованию макроскопической динамической спирально-вихревой структуры. Энергия внешнего термодинамического потенциала поглощается в результате неравновесного фазового перехода межмолекулярными электромагнитными связями и концентрируется в вихре. Момент инерции вихря определяет энергию вращательного движения и, в общем смысле, не имеет ограничений. Внутренняя энергия (12, 13) вихря создаёт, внутрипоточковый термодинамический потенциал. Электромагнитное поле внутри вихря имеет сток внешнего поля, т.е. поглощает энергию внешнего термодинамического потенциала и определяет процесс расширения вихря. Вектор ротора $\text{rot}\vec{v}$ угловой скорости Ω_v вихря направлен по вектору геометрической суммы векторов градиентов внутреннего и внешнего термодинамического потенциала. Ограничение притока внешней энергии приводит к невыполнению неравенств (13), что приводит к деградации вихря и его распаду.

Результаты экспериментальных исследований функций переноса энергии в компрессоре ГТД будут представлены в следующих публикациях.

Литература

1. Алексеенко, С. В. Введение в теорию концентрированных вихрей [Текст] / С. В. Алексеенко, П. А. Куйбин, В. Л. Окулов. – Новосибирск : Институт теплофизики СО РАН, 2003. – 504 с.
2. Чигрин, В. С. Исследование методов обнаружения неустойчивых режимов работы осевых компрессоров с использованием анализа вибраций [Текст] / В. С. Чигрин, С. В. Епифанов, Ф. Мохаммадсадеги // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Том 6, № 7 (78). – С. 23 – 34.
3. Николис, Г. Самоорганизация в неравновесных системах [Текст] / Г. Николис, И. Пригожин. – М. : Мир, 1979. – 512 с.
4. Климонтович, Ю. Л. Введение в физику открытых систем [Текст] / Ю. Л. Климонтович. – М. : Янус-К, 2002. – 284 с.
5. Lighthill, J. Proceedings of the Royal Society. A 407 [Text] / J. Lighthill. – London, Royal Society, 1986. – P. 35-50.
6. Климонтович, Ю. Л. Турбулентное движение и структура хаоса [Текст] / Ю. Л. Климонтович. – М. : Ком. книга. – 2007. – 328 с.
7. Кузьмичёв, В. Е. Законы и формулы физики [Текст] / В. Е. Кузьмичёв. – К. : Наук. думка, 1989. – 864 с.
8. Журавлёв, В. Н. Модель вихревого процесса переноса энергии со скоростью звука в газовых средах [Текст] : монография / В. Н. Журавлёв ; под общей редакцией проф. А. И. Михалёва. – Днепр :

НМетАУ-ИВК «Системные технологии», 2016. – С. 287–298.

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

10. Климонтович, Ю. Л. Статистическая физика [Текст] : учеб. пособие / Ю. Л. Климонтович. – М. : Наука, 1982. – 608 с.

11. Huu, Duc Vo. Rotating Stall Suppression in Axial Compressors with Casing Plasma Actuation [Text] / Duc Vo Huu // Journal of Propulsion and Power. – 2010. – Vol. 26, № 4. – P. 808-818.

12. Повышение ресурса трибосопряжений активированными методами инженерии поверхности [Текст] / П. А. Витязь и др. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 452 с.

References

1. Alekseenko, S. V., Kujbin, P. A., Okulov, V. L. Vvedenie v teoriyu koncentrirovannykh vihrej [Theory of Concentrated Vortices - An Introduction]. Novosibirsk, Institut teplofiziki SO RAN, 2003. 504 p.

2. Chigrin, V. S., Epifanov, S. V., Mohammadsadegi, F. Issledovanie metodov obnaruzhenija neustojchivykh rezhimov raboty osevykh kompressorov s ispol'zovaniem analiza vibracij [A vibration analysis used in the methods of detecting unsteady operational modes of axial compressors]. Eastern-european journal of enterprise technologies, 2015, vol. 6, no. 7 (78), pp. 23–34.

3. Nikolis, G., Prigozhin, I. Samoorganizacija v neravnovesnykh sistemah [Self-organization in nonequilibrium systems]. Moscow, Mir Publ., 1979. 512 p.

4. Klimontovich, Ju. L. Vvedenie v fiziku otkrytyh sistem [Introduction to Physics of Open Systems]. Moscow, Janus-K Publ., 2002. 284 p.

5. Lighthill, J. Proceedings of the Royal Society. A 407. London, Royal Society Publ., 1986, pp. 35-50.

6. Klimontovich, Ju. L. Turbulentnoe dvizhenie i struktura haosa [Turbulent motion and the chaos structure]. Moscow, Kom. Kniga Publ., 2007. 328 p.

7. Kuz'michjov, V. E. Zakony i formuly fiziki [Laws and formulas of physics]. Kiev, Nauk. dumka, 1989. 864 p.

8. Zhuravljov, V. N. Model' vihrevogo processa perenosa jenerгии so skorost'ju zvuka v gazovykh sredah [Model of the vortex process of energy transfer with the sonic speed in gaseous media]. Dnepr, NMetAU-IVK Sistemnye tehnologii Publ., 2016. pp. 287 – 298.

9. Fejnman, R., Lejton, R., Sjends, M. Fejnmanovskie lekcii po fizike. Kinetika. Teplota. Zvuk [Feynman lectures on physics. Kinetics. Heat. Sound]. Moscow, Mir Publ., 1965, Vol 4, no. 4. 260 p.

10. Klimontovich, Ju. L. Statisticheskaja fizika [Statistical physics]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 608 p.

11. Huu, Duc Vo. Rotating Stall Suppression in Axial Compressors with Casing Plasma Actuation. Journal of Propulsion and Power, 2010, vol. 26, no. 4. pp. 808 – 818.

12. Vitjaz', P. A. Povyszenie resursa tribosopryazhenij aktivirovannymi metodami inzhenerii poverhnosti [Increase of the tribological conjunction lifetime by activated surface engineering methods]. Minsk, Belarus. Navuka Publ., 2012. 452 p.

Поступила в редакцию 22.05.2017, рассмотрена на редколлегии 8.06.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. электронных систем Т. В. Критская, Запорожская государственная инженерная академия.

ПРОЦЕСИ САМООРГАНІЗАЦІЇ ВИХРОВИХ СТРУКТУР У ЗАВДАННІ АНАЛІЗУ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПРЕСОРА ГТД

В. М. Журавльов, В. І. Письменний

Запропонована укрупнена мікро- і макроскопічна модель процесів ламінарного і стаціонарно нерівного турбулентного руху газу, що включає в себе каскадні кооперативні процеси енергетичної самоорганізації молекул. Модель заснована на законі збереження енергії з урахуванням того, що випромінювання й поглинання енергії відбувається в процесі фазових переходів. У результаті першого процесу самоорганізації, шляхом подолання динамічної в'язкості процесу ламінарного руху потенційна енергія термодинамічного потенціалу різниці швидкостей шарів газу перетворюється, у результаті нерівного фазового переходу на мікрорівні, в обертвий рух молекул газу. При досягненні критичного параметра теплопровідності (щільності потоку енергії), ініціюється другий процес фазової самоорганізації, що приводить до утворення макроскопічної динамічної спірально-вихрової структури.

Ключові слова: компресор, енергія, турбулентний вихор, самоорганізація, нерівновгий фазовий перехід.

**PROCESSES OF SELF-ORGANIZING OF ROTATIONAL STRUCTURES
IN THE PROBLEM OF THE ANALYSIS OF EFFICIENCY OF COMPRESSOR TURBO-ENGINE**

V. N. Zhuravlev, V. I. Pismenny

The extended micro- and macroscopic model of laminar and stationary nonequilibrium turbulent processes of gas movement, including cascade cooperative processes of molecules energy self-organizing is under review. The model is grounded on a conservation of energy, taking into account that energy emission and consumption occurs during change of phases. As a result of the first self-organizing process by overcoming the dynamic viscosity of laminar movement process, the potential energy of thermodynamic potential of gas thicknesses speed differences is transformed to the gas molecules rotation movement due to nonequilibrium change of phases on micro-level. At the critical heat conduction parameter (energy flow density), the second phase self-organization process is activated, and it occurs the vortex dynamic macroscopic structure formation.

Keywords: the compressor, energy, turbulent vortex, self-organising, nonequilibrium change of phases.

Журавлёв Владимир Николаевич – д-р техн. наук, начальник сектора обработки сигналов ГТД Управления информационных технологий ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: ws50@i.ua.

Письменный Владимир Иванович - главный конструктор тематического направления "Новые авиационные двигатели" ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: PismennyVI@zmdb.ua.

Zhuravlev Vladimir Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, the chief of sector of handling of signals of the gas-turbine engine of Control of informational techniques of the state enterprise "Ivchenko-progress", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: ws50@i.ua.

Pys'menny Vladimir Ivanovich - the principal designer of a subject direction "New aviation engine" of the state enterprise "Ivchenko-progress», Zaporozhye, Ukraine, e-mail: PismennyVI@zmdb.ua.