

01:03

©1995 г.

САМООРГАНИЗАЦИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТЕПЛА В РАБОТУ

Г.В.Скорняков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Поступило в Редакцию 6 июня 1994 г.)

Самоорганизация рабочего вещества при преобразовании тепла в работу снимает известные ограничения на эффективность преобразования. Физическим процессом, обеспечивающим самоорганизацию, может быть конвекция газа в силовом поле. В качестве основного рабочего элемента преобразователя предлагается вихревая турбина.

Введение

Преобразование тепла в работу принято рассматривать как результат циклического изменения термодинамических переменных рабочего тела. В результате этих изменений поступающее из нагревателя в рабочее тело тепло частично преобразуется в работу, а частично передается холодильнику. В этой связи обычно говорят о невозможности полного преобразования тепла в работу [1].

Казалось бы, это утверждение есть непосредственное следствие баланса энергии (мощности) и баланса энтропии. Для стационарного процесса преобразования тепла в работу баланс энергии может быть записан в виде

$$W = Q_1 - Q_2, \quad (1)$$

а баланс энтропии

$$\frac{Q}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} + S = 0, \quad (2)$$

где W — мощность преобразователя; Q_1 — тепловой поток, поступающий в него из нагревателя; Q_2 — тепловой поток, поступающий в холодильник; T_1 — температура нагревателя; Q_1/T_1 — поток энтропии из нагревателя; T_2 — температура холодильника; Q_2/T_2 — поток энтропии в холодильник; S — производство энтропии в системе за единицу времени.

При определении эффективности преобразования тепла в работу поступающее в холодильник тепло принято считать "бросовым" и определять КПД процесса η отношением

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} - \frac{ST_2}{Q_1} = \eta_c - \frac{ST_2}{Q_1}, \quad (3)$$

где $\eta_c = 1 - T_2/T_1$ — КПД цикла Карно.

В замкнутой системе, близкой к термодинамическому равновесию, производство энтропии практически всегда положительно. Однако в сильно неравновесных открытых системах могут происходить процессы, характеризующиеся высокой степенью самоорганизации. Производство энтропии в таких процессах отрицательно (S — теорема Климонтовича) [2]. Поэтому для повышения эффективности преобразования тепла в работу естественно применить в качестве одного из элементов преобразователя сильно неравновесную открытую систему.

Преобразование тепла в работу в реальных системах и возможная роль самоорганизации

Представления о преобразовании тепла в работу в результате циклических изменений термодинамических переменных рабочего тела используются лишь в теоретических построениях. В реальных системах, таких как современные паросиловые установки, преобразование тепла в работу производится в результате циркуляции массы рабочего тела через нагреватель, турбину, холодильник и гидравлический насос. Каждый достаточно малый элемент массы рабочего тела можно рассматривать как замкнутую термодинамическую систему, циклически изменяющую в ходе циркуляции свои термодинамические характеристики. Эти изменения во всей совокупности элементов массы и приводят в итоге к непрерывному преобразованию тепла в работу. Эффективность этого установившегося процесса может быть определена не только из анализа изменения характеристик отдельных элементов массы, но и из рассмотрения процессов в рабочем веществе всей системы преобразования, включающей в себя как основные элементы системы, так и связывающие их коммуникации. Отдельные части системы преобразования представляют собой открытые системы, и лишь вся система в целом — замкнутую. При обратимости процесса изменения термодинамических переменных элементов массы рабочего тела оба эти подхода эквивалентны. Однако в случае нарушения этого условия второй подход становится не только более предпочтительным, но и единственно возможным.

В стационарном процессе энтропия заполняющего преобразователь рабочего вещества остается неизменной. В отсутствие каких-либо элементов самоорганизации единственным стоком энтропии служит холодильник. Обычно для увеличения КПД стремятся создать условия для минимального отклонения состояния рабочего тела от термодинамически равновесного и соответственно для минимального производства энтропии в системе преобразования. При введении в преобразователь элемента, обеспечивающего эффективную самоорганизацию и отрицательное производство энтропии, следует в максимально возможной степени отойти от термодинамического равновесия рабочего вещества в нем.

Для полного преобразования поступающего из нагревателя тепла в работу необходимо компенсировать с помощью неравновесной открытой системы не только приток энтропии из нагревателя, но и ее практически неизбежное производство в других элементах преобразователя. Если суммарное производство энтропии в преобразователе будет отрицательно и по абсолютной величине превысит ее приток из нагревателя, то необходимость применения холодильника отпадет. В этом случае поступающее из нагревателя тепло полностью преобразуется в работу. Впрочем, любое превышение КПД преобразователя над КПД цикла Карно открывает принципиальную возможность полного преобразования тепла в работу.

Использование для анализа процессов преобразования тепла в работу термодинамической категории "энтропия" может вызвать некоторые сомнения. В случае многопараметрических систем сама возможность введения понятия энтропии накладывает на термодинамические характеристики рабочего вещества весьма жесткие ограничения [3,4]. Выполнение накладываемых этими ограничениями условий для широкого круга веществ никогда не было даже предметом экспериментальных исследований. В некоторых конкретных случаях они заведомо не выполняются. Однако в случае паро-жидкостных систем эти условия выполнены, если пар считать идеальным или ван-дер-ваальсовым газом [5,6].

Хотя система преобразования в целом далека от термодинамического равновесия и характеризуется высокими градиентами температуры, давления и интенсивными потоками рабочего вещества, достаточно малые его элементы находятся в термодинамически равновесном состоянии (принцип локального термодинамического равновесия). Справедливость этого принципа в применении к пару с параметрами, обычными для современных энергетических установок, обусловлена тем, что время установления статистического равновесия в элементе массы значительно меньше характерных времен течения рабочего вещества в системе. Соответственно можно говорить и о статистическом (термодинамическом) равновесии в тех частях циркуляционного контура преобразователя, где течение замедляется и надолго задерживается рабочее вещество.

Единственным фактором, влияющим на равновесную функцию распределения, может быть силовое поле, изменяющее энергию молекул газа. Казалось бы, поле, изменяя равновесную функцию распределения, никак не может повлиять на сам факт реализации статистического равновесия в системе, соответствующего максимуму ее энтропии, а тем более способствовать процессам самоорганизации в ней. Действительно, при наличии силовых полей (например, силы тяжести на Земле) давление в состоянии термодинамического равновесия описывается барометрической формулой. Однако не только давление, но и температура атмосферы Земли оказывается зависящей от высоты. Высота зависимости температуры обусловлена в основном вертикальными конвективными потоками. Вертикальные конвективные потоки в поле силы тяжести приводят к уменьшению температуры с высотой, причем это уменьшение в точности совпадает с границей конвективной устойчивости газа в поле силы тяжести [7]. В самом грубом прибли-

жении высотный градиент температуры равен [8]

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{(\gamma - 1)Mg}{\gamma R}, \quad (4)$$

а условие конвективной устойчивости газа [9] имеет вид

$$\frac{dT}{dz} > -\frac{g}{c_p}, \quad (5)$$

где γ — показатель адиабаты, M — молекулярный вес газа, g — ускорение силы тяжести, R — газовая постоянная, c_p — удельная теплоемкость газа при постоянном давлении.

Поскольку $M c_p = \gamma R / (\gamma - 1)$, то правые части (4) и (5) совпадают. Поэтому неизбежные возмущения имеют своим следствием не просто какое-то нарушение термодинамического равновесия в атмосфере Земли, а развитие конвекции и установление вполне закономерного падения температуры с высотой. Реальный высотный градиент температуры в атмосфере Земли лишь немногим меньше определяемого формулой (4), при выводе которой не учитывались, в частности, такие процессы, как тепловыделение при конденсации водяных паров, лучистая теплопроводность и др.

Таким образом, хотя барометрическая формула при постоянстве температуры и отсутствии макроскопических движений описывает равновесное состояние атмосферы Земли, соответствующее максимуму ее энтропии, реальное положение дел не укладывается в эту общую и простую схему. Конвективные процессы в случае газа, находящегося в поле силы тяжести, приводят к возникновению и эффективному поддержанию высотного градиента температуры.

Самоорганизация в вихревом потоке

Роль сил земного тяготения в работе преобразователей, имеющих масштабы обычных паросиловых систем, пренебрежимо мала. Использование силы тяжести для создания условий, способствующих самоорганизации в рабочем веществе систем такого масштаба, не представляется возможным. Влияние градиента давления в них и обусловленных им высоких значениях ускорения и скорости потока значительно превосходит воздействие гравитации. Но именно высокие скорости движения рабочего вещества открывают принципиальную возможность развития в нем интенсивных процессов самоорганизации, эффективность которых намного превосходит эффективность процессов самоорганизации в земной атмосфере.

Термодинамическое равновесие характеризуется отсутствием внутренних макроскопических движений, а также градиентов температуры и химического потенциала. Это требование к термодинамически равновесной системе имеет немаловажное исключение. Термодинамически равновесной может быть не только система с покоящимися относительно друг друга элементами объема, но и система, равномерно вращающаяся как целое [10]. В последнем случае элементы объема неподвижны относительно друг друга во вращающейся системе координат, причем на них действует поле центробежных сил.

Эффективным методом создания систем, в которых на рабочее вещество действует интенсивное поле центробежных сил, может служить инжекция выходящего из сопла Лавала газового потока в трубу перпендикулярно направлению оси трубы по касательной к ее внутренней поверхности (труба Ранка [11]). При поступлении газа в трубу Ранка происходит не торможение потока, а лишь изменение направления его скорости. Инжектируемый со скоростью v_{in} пар движется по поверхности вихревой трубы радиуса r_0 с угловой скоростью $\omega = v_{in}/r_0$. Этот прижатый центробежными силами к поверхности трубы газ распространяется вдоль трубы и образует реально существующий в ней вихревой поток, за основную моду которого можно принять равномерное вращение с угловой скоростью ω . Различие реального поля скоростей вихревого потока и поля скоростей основной моды играет роль возмущения, обеспечивающего развитие радиальной составляющей скорости вихря.

Основной составляющей скорости потока в трубе является не аксиальная, а полоидальная. Поэтому поступающее в трубу рабочее вещество надолго задерживается в ней, что дает основание говорить об установлении во вращающемся потоке состояния, близкого к термодинамическому равновесию. Влияние возникающих в вихревом потоке интенсивных центробежных сил вполне аналогично влиянию силы тяжести на земную атмосферу: температура газа в вихре уменьшается вследствие радиальной конвекции в направлении к его оси вращения (эффект Ранка [11]).

Нетрудно создать условия, при которых центробежные силы в вихревом потоке на 5–6 порядков величины превышают силу тяжести на поверхности Земли. Соответственно характерный масштаб процессов, составляющий в условиях земной атмосферы 1 км, в вихревом потоке равен 1 мм, а радиальный градиент температуры достигает нескольких десятков градусов на сантиметр [12]. Естественно использовать такую сильно неравновесную открытую систему с высокой степенью самоорганизации для преобразования тепла в работу [13,14].

Вихревая турбина

В качестве элемента системы, производящего работу, можно применить вихревую турбину. Основными элементами вихревой турбины являются труба Ранка, переходящая во вращающуюся неосесимметричную вихревую трубу, играющую роль детандера, и жестко соединенное с нею сегнерово колесо, выполняющее функции сепаратора фаз, двигателя и насоса. Принципиальные схемы устройства и циркуляции рабочего вещества в нем приведены на рисунках.

Передача энергии и крутящего момента на внешнюю нагрузку происходит как вследствие истечения жидкой фазы из сопел сегнерова колеса, так и в результате взаимодействия вихревого потока с неосесимметричной внутренней поверхностью вихревой трубы ротора. В качестве элемента, обеспечивающего передачу крутящего момента и сохранение структуры вихря, принято плавное изменение радиуса кривизны сечения вращающейся вихревой трубы и придание ей формы спирали (например, спирали Архимеда).

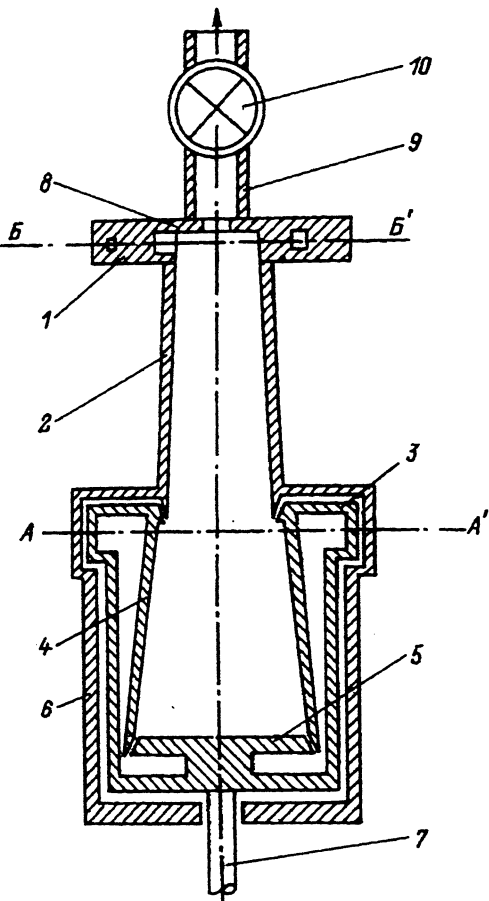


Рис. 1. Продольный разрез вихревой турбины.

1 — спиральное сопло Лавалья; 2 — вихревая труба Ранка; 3 — ротор вихревой турбины; 4 — вихревая труба ротора; 5 — дроссельная заслонка; 6 — кожух вихревой турбины; 7 — ось внешней нагрузки; 8 — диафрагма трубы Ранка; 9 — труба, ведущая к холодильнику; 10 — вентиль, регулирующий поток газа в холодильник.

Тепло преобразуется в работу следующим образом. Образованный в нагревателе пар поступает в инжектор вихревой трубы Ранка, представляющий собой спиральное сопло Лавалья 1. При движении пара в сопле Лавалья происходят его ускорение до скоростей порядка тепловой скорости молекул на входе в сопло и интенсивное охлаждение в сопутствующей системе координат. В результате в коническую вихревую трубу Ранка 2 поступает высокоскоростной поток переохлажденного и частично сконденсировавшегося пара, образующего в ней вихрь, вращающийся с высокой угловой скоростью ω . Вихревой поток поступает во вращающуюся с угловой скоростью Ω ($\Omega \ll \omega$) вихревую трубу 4, где в результате взаимодействия с ее неосесимметричной внутренней поверхностью часть энергии вихря передается на внешнюю нагрузку. Структура вихря при переходе из вихревой трубы Ранка во вращающуюся вихревую трубу существенно не меняется. Конвекция пара и его охлаждение в вихревом потоке приводят к его дальнейшей конденсации, а образующаяся жидкая фаза под действием центробежных сил в вихре выпадает "дождем" на поверхность вихревой трубы Ранка, а также вращающейся вихревой трубы и стекает в направлении их расширения к дроссельной заслонке 5, через которую направляется в полость ротора 3 и поступает к соплам сегнера колеса 11. Зна-

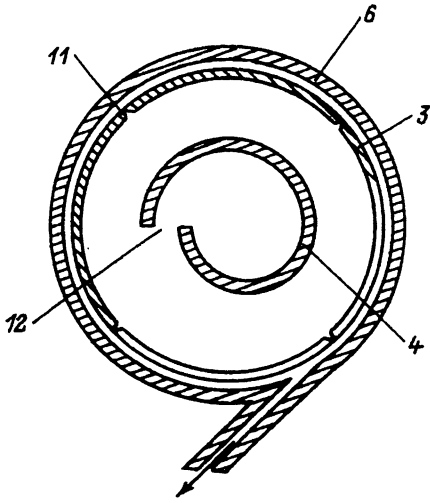


Рис. 2. Поперечный разрез AA' вихревой турбины.
 11 — сопло сегнера колеса, 12 — продольная щель в вихревой трубе ротора.

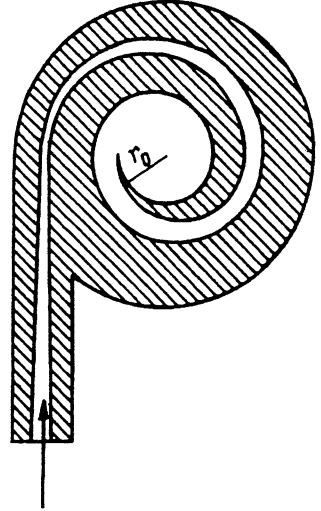


Рис. 3. Поперечный разрез BB' спирального сопла Лавала.

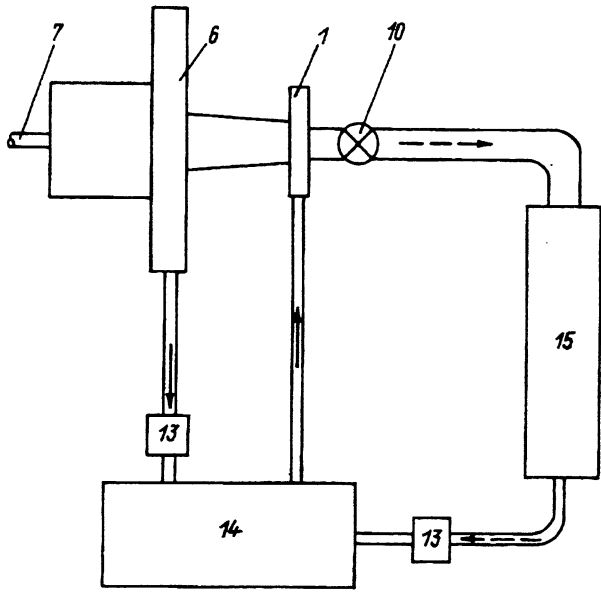


Рис. 4. Схема циркуляции рабочего вещества.
 13 — гидравлический насос, 14 — нагреватель, 15 — холодильник.

чительное гидравлическое сопротивление сопел приводит к накоплению слоя жидкости в полости ротора. Выходящая из сопел в кожух 6 жидкость с помощью гидравлического насоса с обратным клапаном 13 направляется в нагреватель 14.

Часть поступающего в вихревую турбину потока рабочего вещества через ventиль 10 направляется непосредственно в холодильник 15. В процессе пуска вихревой турбины, пока не произошло еще накопления слоя жидкости в полости ротора, обеспечивающего прохождение всей сконденсировавшейся жидкости сквозь сопла сегнера колес, полное открытие ventиля должно обеспечивать поступление в холодильник практически всего потока рабочего вещества, поступающего из нагревателя.

Во всех обычных термодинамических циклах движение рабочего вещества при производстве работы происходит в направлении уменьшения давления, которое совпадает с направлением уменьшения термодинамического потенциала. В случае вихревой турбины давление, под которым жидкость поступает к соплам сегнера колес, значительно превосходит давление пара в вихревой трубе Ранка. По существу вихревая турбина в стационарном режиме выполняет функции преобразователя тепла в работу, холодильника и гидравлического насоса.

Движение рабочего вещества в направлении уменьшения давления происходит в паропроводе и в сопле Лавалья. При поступлении пара в вихревую трубу Ранка и его дальнейшем движении в вихревой турбине решающую роль играют центробежные силы, приводящие к тому, что направление уменьшения давления становится противоположным направлению уменьшения термодинамического потенциала.

Для анализа движения рабочего вещества в полости ротора могут быть использованы известные положения термодинамики вращающихся тел [10]. Рабочее вещество движется не в направлении уменьшения давления, а в направлении уменьшения химического потенциала $\mu = \mu_0(P, T) - m\Omega^2 r^2 / 2$, где $\mu_0(P, T)$ — химический потенциал покоящегося тела, m — масса молекулы, причем основным определяющим фактором является зависимость химического потенциала от радиуса и угловой скорости вращения вихревой турбины. Еще более значительна роль центробежных сил в вихревом потоке. Такое поведение термодинамического потенциала и обуславливает функционирование системы.

При поступлении рабочего вещества в вихревую трубу Ранка происходит коренное изменение его энергетического спектра. В результате взаимодействия потока с поверхностью трубы возникает интенсивное поле центробежных сил. Поскольку инжекция газа производится со сверхзвуковой скоростью, то кинетическая энергия вихревого потока намного превосходит тепловую. Соответственно пределы изменения потенциальной энергии рабочего вещества во вращающейся системе координат намного превосходят его тепловую энергию. Вовлечение рабочего вещества в интенсивный вихревой поток можно рассматривать как один из способов управления термодинамическими характеристиками тел [15]. Однако функционирование преобразователя основано не на использовании изменения спектра равновесной термодинамической системы в тепловом рабочем цикле, а на создании условий для развития процессов самоорганизации.

Интенсивное макроскопическое движение рабочего вещества делает проблематичной саму возможность строгого определения его тепловых характеристик [16]. Поэтому любые теоретические оценки параметров процессов в вихревых потоках, базирующиеся на использовании термодинамических категорий, могут быть лишь качественными. Примечательно, что такие грубые оценки находятся в удовлетворительном соответствии с весьма скудными экспериментальными данными.

Поведение газа в вихревой турбине кардинально отличается от его поведения в обычных преобразователях. При работе обычных систем преобразования достаточно малый элемент массы рабочего тела сохраняет свою целостность на протяжении по крайней мере одного цикла прохождения через систему. Иная ситуация складывается при поступлении газового потока в вихревую турбину. Интенсивное перемешивание в вихревом потоке лишает смысла само представление об элементе массы рабочего тела, циклически изменяющем свои термодинамические характеристики. Поэтому становится невозможным базирующийся на таком представлении анализ работы преобразователя, в котором существует вихревой поток.

Хотя система преобразования тепла в работу функционирует в режиме замкнутой циркуляции, ни один элемент массы рабочего тела не претерпевает циклического изменения своих термодинамических переменных ввиду интенсивного перемешивания рабочего вещества в вихревом потоке. При этом перемешиваются различные элементы массы, находящиеся в преобразователе, а сепарируется жидкая фаза, принадлежащая им всем. В ходе циркуляции неограниченно малая доля любого элемента массы неограниченно долго задерживается в вихревом потоке, перемешиваясь с поступающим в него паром, в составе которого находятся доли того же элемента массы, неоднократно прошедшие через преобразователь. Перемешивание обычно ассоциируется с ростом энтропии. Однако перемешивание в потоке различных порций рабочего вещества с одинаковыми термодинамическими характеристиками не изменяет удельную энтропию (парадокс Гиббса). Более того, только благодаря перемешиванию становится возможной самоорганизация и отрицательное производство энтропии. Любые гидродинамические течения, происходящие без теплообмена с окружающей средой и сохраняющие целостность отдельных элементов массы, практически всегда сопровождаются ростом энтропии и лишь в исключительных случаях происходят адиабатически (изэнтропически).

В вихревом потоке создается типичная синергетическая ситуация: радиальная конвекция приводит к возникновению радиального температурного градиента, способствующего в свою очередь усилению радиальной конвекции, отклонение от термодинамически равновесного состояния вращающегося газа усиливается, и развивается процесс самоорганизации потока.

В области давлений и температур, значительно меньших критических, теплота фазового перехода в расчете на одну молекулу q значительно, как правило — на порядок, превосходит тепловую энергию газа ($q \gg T$, постоянная Больцмана принята равной единице). Поступающее из нагревателя тепло расходуется почти исключительно на испарение. При конденсации каждой молекулы в равновесных условиях при температуре T энтропия уменьшается на величину, равную q/T [10]. Скорость уменьшения энтропии вследствие конденсации со-

ставит величину $S_c = -\Theta \cdot Q_1/T$, где Θ — доля рабочего вещества, сконденсировавшегося в преобразователе. В этих условиях изменения температуры при циркуляции рабочего вещества в замкнутом контуре преобразователя существенной роли в изменении энтропии не играют, особенно если учесть, что энтропия как газа, так и жидкости зависит от температуры логарифмически, и изменение энтропии в основном определяется процессами испарения и конденсации. Поэтому зависимостью теплоты фазового перехода и энтропии от температуры можно пренебречь.

Полное производство энтропии в вихревой турбине S равно сумме производства энтропии в диссипативных процессах S_d и уменьшения энтропии при конденсации S_c : $S = S_d - \Theta Q_1/T$, ($S_d \geq 0$). В результате

$$\eta = \eta_c - \frac{S_d T_2}{Q_1} + \frac{\Theta T_2}{T}. \quad (6)$$

Пренебрегая неравновесностью конденсации в потоке, а также производством энтропии в диссипативных процессах и различием T_1 , T_2 и T , имеем $\eta \cong \Theta$. В этом приближении КПД определяется исключительно степенью конденсации пара в вихревом потоке. Несконденсировавшаяся часть поступающего в вихревую турбину пара направляется непосредственно в холодильник и в производстве работы не участвует.

Соответственно мощность вихревой турбины в этом приближении равна

$$W \cong \Theta q_0 dm/dt \cong \Theta Q_1, \quad (7)$$

где q_0 — удельная теплота испарения; dm/dt — масса рабочего вещества, проходящего через сопло Лавала за единицу времени.

Кардинальным отличием системы преобразования тепла в работу, использующей вихревую турбину, от всех других известных систем, предназначенных для этой цели, является введение в нее элемента, в котором происходит самоорганизация рабочего вещества. Для остальных элементов системы преобразования тепла в работу, как и для обычных систем, характерны процессы диссипации.

Заключение

Следует иметь в виду, что условия конденсации в вихревом потоке изучены недостаточно. Известно, что характеристики вихревых потоков весьма чувствительны к качеству обработки поверхности вихревой трубы, геометрии инжектора и других частей трубы Ранка. Влияние некоторых условий, в частности примеси тяжелого одноатомного газа, заведомо облегчающей условия конденсации в вихревом потоке, никогда не было исследовано. Сама конструкция описанной системы преобразования делает ее удобным инструментом для такого рода исследований, так как дает возможность регулировать поток рабочего вещества через холодильник. Поэтому вихревую турбину можно рассматривать не только в качестве преобразователя тепла в работу, но и как инструмент для исследования характеристик вихревых потоков и процессов самоорганизации в них в широком диапазоне различного рода условий.

Процесс конденсации пара в вихревом потоке зависит от эффективного отвода выделяющейся при этом энергии. Баланс энергии при

конденсации пара в неподвижной вихревой трубе Ранка устанавливался за счет интенсивного акустического и электромагнитного излучения. Даже в этом случае в сравнительно короткой трубе конденсировалась значительная доля пара, измеряемая десятками процентов [12]. Передача энергии вихревого потока на внешнюю нагрузку с помощью неосесимметричной вращающейся вихревой трубы существенно способствует процессу конденсации. Очевидно, что конденсация пара, будучи процессом объемным, при заданном радиусе вращающейся вихревой трубы происходит тем более полно, чем больше длина трубы. Достаточно большая длина трубы обеспечит полную конденсацию поступающего из сопла Лавалья пара и полное преобразование тепла в работу.

Автор признателен А.С. Зильберглейту за конструктивную критику.

Список литературы

- [1] *Леонтович М.А.* Введение в термодинамику. Статистическая физика. М.: Наука, 1983. 416 с.
- [2] *Климонтович Ю.Л.* // УФН. 1989. Т. 158. № 1. С. 59–91.
- [3] *Скорняков Г.В.* // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 3. С. 579–581.
- [4] *Silbergleit A.S., Skornyakov G.V.* // Proc. of the 59th WE-Heraeus Seminar. EPS, Geneva, 1990. P. 193–204.
- [5] *Зильберглейт А.С., Скорняков Г.В.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 10. С. 177–1180.
- [6] *Зильберглейт А.С., Скорняков Г.В.* // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 2. С. 190–195.
- [7] *Скорняков Г.В.* ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 11. С. 2226–2228.
- [8] *Кубо Р.* Термодинамика. М.: Мир, 1970. 304 с.
- [9] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
- [10] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Статистическая физика. М.: Наука, 1964. 567 с.
- [11] *Ranque G.* Bull. Bi-Mensuel de la Societe Francaise de Physique. 1933. N 342. P. 112S–115S.
- [12] *Финько В.Е.* // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 9. С. 1770–1776.
- [13] *Скорняков Г.В.* // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 22. С. 12–14.
- [14] *Silbergleit A.S., Skornyakov G.V.* // Proc. of the 111th WE-Heraeus Seminar. EPS, Geneva, 1993. P. 71–84.
- [15] *Скорняков Г.В.* // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 6. С. 1259–1260.
- [16] *Скорняков Г.В.* О тепловых характеристиках движущихся тел. Препринт ФТИ. № 820. Л., 1983. 11 с.