

УДК 532:621.181:621.048

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МОМЕНТА ВРАЩЕНИЯ В КАМЕРЕ АППАРАТА ВИХРЕВОЙ ПОТОЧНОЙ ГАЗОГЕНЕРАЦИИ ТВЕРДОГО СЫРЬЯ

Потапов В.Н., Костюнин В.В.

ООО «Вихревые газовые системы», Екатеринбург

Известно, что при закрутке газовых и газопылевых потоков любыми камерными завихрителями (улитками, циклонами и др.) в аппаратах для сжигания или огневой переработки твердых топлив, отходов и биомассы, создаются неоднородные, несимметричные, спиралевидные потоки. При закрутке двухфазных потоков всегда происходит сепарация твердой взвеси в некоторых, часто во вполне определенных зонах, занос боковых стенок и торцов камер частицами взвеси или шлакование этих зон. Это нарушает всю структуру вихря в камерных аппаратах – завихрителях, деформирует потоки и снижает крутку вихрей и горящих факелов на их основе.

Поэтому, например горелки с улиточными регистрами для сжигания углей, всегда отличаются высокой неполнотой сгорания, а ее ликвидация всегда сопровождается повышением избытков воздуха в факеле и в топке, что снижает КПД устройства и усиливает генерацию оксидов азота (NO_x).

Как ни странно, пока до сих пор нет полного понимания механизмов образования спиралевидных двухфазных потоков (вихрей) в вихревых камерах, которые по всем, в значительной мере умозрительным оценкам, должны формировать равномерные, относительно симметричные потоки. Поэтому на практике часто не хватает инженерных средств воздействия на формирование двухфазного вихря, его воспламенение и полное выгорание. Единственными пока доступными приемом является исполнение горелок из набора длинных концентрических соосных канлов воздуха и аэропыли с индивидуальными завихрителями и плохообтекаемыми телами на выходе из каналов, а улитки часто заменяют на лопаточные регистры. Так делает большинство фирм, производящих горелки для угольных котлов. Но этого часто недостаточно для настройки нестехиометрического сжигания углей со стадийным управлением дефицита O_2 в ряде зон факела для достижения экономичности и экологической безопасности топочного процесса.

Очень остро эта проблема проявляется при поточной газогенерации любой пылевидной органической массы или углей в вихре, когда уже не помогает использование параллельных потоков, достигающее трех и более с неуправляемой или малоуправляемой крутой. Еще сложнее ситуация при использовании одного камерного завихрителя потока взвеси, циклонами и разным вихревым пылеуловителям такого же типа. Во многих вихревых аппаратах для пылеулавливания и сепарации твердых частиц происходит вынос уже уловленных и сконцентрированных потоков твердых частиц, разрушая всю технологическую основу процесса. Поэтому эти устройства отличаются недостаточной надежностью и эффективностью, вопреки данным испытаний их моделей, полученным в усло-

виях лабораторий. Изучение структуры вихря в объеме стандартной улитки одним из авторов, выполнено еще в конце 70-х годов, показало, что даже стандартная улитка, как и многие циклоны, в принципе, не способны создать симметричный вихрь с симметричными полями скоростей, давлений и распределений концентраций взвеси, даже на периферии аппаратов и на выходе из них.

Позже, нами однозначно установлено, что момент вращения потока в улитке формируется не только и не столько во входном патрубке улитки при подаче газа, сколько в заметной мере – у боковой стенки улитки в зоне деформации струи в процессе ее поворота вдоль стенки на угол, примерно в диапазоне изменений 130-230 градусов. Во-вторых, там же, у боковой стенки всегда возрастают тангенциальные скорости вихря и при этом падает статическое давление в этой зоне объема улитки. Вихрь при этом неизбежно деформируется. Его ось вращения и приосевая зона обратного тока (внутренней эжекции) всегда смещена поэтому от продольной оси симметрии выходного окна улитки – в сторону ее боковой стенки при том же угле поворота струи, примерно на те же 130 – 230 градусов (рис. 1)



Рис. 1. Естественные деформации двухфазного вихря (а) и локализации характерных зон отложений твердой взвеси (б) в стандартной улитке

В-третьих, за областью повышения момента вращения вихря у стенки улитки при повороте струи на 250–300 градусов начинается отложение взвеси у боковой стенки, вплоть до поворота струи на 360 градуса, то есть до среза входного сопла. Часть этой концентрированной взвеси, ранее уже отсепарированной на стенке улитки выносится из нее через выходное окно при повороте в ней потока примерно на 250–360 градусов, нивелируя этим почти весь заверченный до этого места процесс центробежной сепарации твердой фазы. В таком устройстве при организации огневых процессов в его объеме часто образуются устойчивые заносы и шлакование стенок, как при горении, так и при газификации углей или биомассы. Появление зон заноса подробно исследовал другой автор текста на холодных прозрачных моделях и в аппаратах с горением и газификацией топлив и органики. Заносы и шлакование боковой стенки улитки и циклона обычно возникают на двух участках поворота струи: на 60–110 градусов, и особенно активно, при повороте струи на 250–360 градусов (рис. 1). Две зоны отложений на стенке улитки сильно влияют на всю структуру вихря и могут разрушить техно-

логическую схему огневого аппарата. Многократное повышение скорости во входном сопле улитки, как правило, не приводит к полному устранению отложений на стенках многих типов улиток или циклонов.

Это подтвердили и наши холодные продувки разных прозрачных моделей улиток и им подобных завихрителей на двухфазных потоках. Очевидно, что все меры по устранению зон заноса твердой фазой стенки улитки и иного камерного завихрителя, а также выноса из этих регистров концентрированной взвеси положительно изменяют характеристики любой вихревой технологии, как с горением, так и в холодных камерах. В основу разработки этих мер нами положено предположение о том, что все нами отмеченные негативные эффекты, известные специалистам, связаны, так или иначе, с особенностями распределения в объеме вихря в улитке или циклоне момента вращения и осевого импульса. Пока остановимся лишь на оценках неоднородности переноса и распределения момента вращения в улитке и его влияния на сепарацию и вынос твердого материала.

Работы одного из авторов в 80-е годы показали, что распределение момента вращения в улитке крайне неравномерно по радиусу и по длине струи в процессе ее поворота вдоль криволинейной стенки в ходе закрутки в улитке, а турбулентное прераспределение импульса и момента определяют все деформации профилей скоростей и давлений в объеме, а не наоборот. На указанные процессы, конечно, влияют все геометрические особенности устройства. Причем с позиций анализа структуры вихря, формируемого улиткой, важно рассмотрение распределений в ней даже не собственно момента, а плотности потока этого момента вращения вдоль (параллельно) оси вращения вихря и в поперечных сечениях струи, развивающихся вдоль боковой стенки. Векторная величина интегрального момента вращения вихря сама по себе при этом второстепенна. Наш опыт показал, – что самое главное в процессах в объеме камерного регистра – это распределение в нем плотностей потоков момента вращения и потоков импульса.

Можно рассматривать два подхода к определению плотности потока момента вращения. Это связано с двумя разными моделями определения крутки вихря, чаще всего встречающихся в литературе. Они отличаются особенностями представления момента. В первых, классических работах, определении элементарного, текущего момента вращения $m_{\text{пл}i}$ вихря (1), или момента некоторого элементарного объема вихря на текущем радиусе R_i , а также суммарного момента вихря, а в нашем случае, еще и плотности потока элементарного момента вращения $\rho_{\text{мпл}}$ (2), – используется квадрат вращательной скорости $W_{\phi i} \cdot W_{\phi i}$. Этот вихрь мы условно называем плоским. При текущем значении плотности газа ρ_i в той же точке, на том же радиусе R_i , изменяющегося с шагом ΔR , момент переносится через площадки $f_{\phi i}$, которые составляют поперечные сечения, условно пересекающие газовую струю в улитке перпендикулярно тангенциальным скоростям $W_{\phi i}$, в нашем случае, – по восьми радиусам, через 45 градусов поворота. На каждом из этих радиусов (от R_1 до R_8) сечение и все, составляющие его площадки $f_{\phi i}$, через которые идет перенос момента вращения, всегда перпендикулярны тангенциальным компонентам полного вектора скорости в вихре $W_{\phi i}$.

$$m_{\text{пл}i} = \pi \cdot \rho_i \cdot W_{\phi i} \cdot W_{\phi i} \cdot R_i^2 \cdot \Delta R \quad (1)$$

$$\rho_{\text{мпл}} = m_{\text{об}i} / f_{\phi i} \quad (2)$$

Локализация максимумов этих плотностей потоков моментов в среднем поперечном сечении улитки в представлениях модели плоского вихря показана на рис. 2 (справа). Эти данные дополним еще иным представлением момента вращения. Локализация максимумов плотности потока этого момента вращения показана на рис. 2 (слева). Это момент в представлении модели объемного вихря (наша внутренняя терминология). Это плотность потока момента вращения $\rho_{mioб}$ вдоль оси вращения вихря. Определяем сам этот текущий момент вращения $m_{оби}$ в представлениях объемного вихря, как момент вращения элементарного объема вихря, переносимого вихрем в единицу времени, через некоторую элементарную площадку поперечного сечения вихря f_{zi} , уже перпендикулярную оси вращения всего вихря или перпендикулярную осевой компоненте полного вектора скорости, иначе осевой скорости W_{zi} :

$$\rho_{mioб} = m_{оби} / f_{zi} \quad (3)$$

Величину плотности потока момента вращения и момента вращения в представлении объемного вихря, мы определяем по аналогии со многими современными работам, в которых при определении крутки вихря момент его вращения рассчитываем через произведение вращательной скорости на скорость осевую $W_{\phi i} \cdot W_{zi}$:

$$m_{оби} = \pi \cdot \rho_i \cdot W_{\phi i} \cdot W_{zi} \cdot R_i^2 \cdot \Delta R \quad (4)$$

Картина такого переноса момента вращения по модели объемного вихря наглядно демонстрирует характер выноса момента вращения в тех или иных зонах вихря через элементарные площадки, перпендикулярные оси вращения вихря, иначе, – площадкам перпендикулярным осевым компонентам вектора скорости W_{zi} . Этот вынос момента вращения из объема улитки лучше всего демонстрирует левая часть рис. 3.

Сопоставление распределений плотностей потоков момента в улитке в обеих моделях представления момента вращения $\rho_{miпл}$ и $\rho_{mioб}$ и отнесение моментов элементарных объемов вихря к площадкам, ориентированным по-разному относительно оси вихря и двух компонентов полного вектора скорости, позволяют прояснить как механизмы формирования структуры интегрального вихря (однофазного и двухфазного), так и, прежде всего, уточнить механизмы образования заносов взвесью двух выделенных выше участков боковой стенки улитки (рис. 1). Одновременно этот подход нам показал механизм неизбежного и всегда нежелательного выноса из улитки через выходное окно ранее уже отсепарированной и сконцентрированной у ее боковой стенки твердой фазы, причем во вполне определенном месте, показанном выше, на рис. 1.

Рассмотрение распределений в улитке плотностей потока момента вращения $\rho_{miпл}$, рассчитанного с использованием модели плоского вихря (рис. 2, справа), сопоставление их с наблюдениями потока взвеси (рис. 1, также справа) в прозрачной камере, считаем, дает однозначное понимание характера сепарации взвеси и ее отложения на боковой стенке. Во-первых, эта сепарация неравномерна по длине боковой стенки улитки. Во-вторых, визуальные наблюдения показали нам, что отложение взвеси на стенках происходит именно в тех двух зонах улитки, где имеет место наибольшее снижение, точнее потери вихрем этого мо-

мента вращения. Причем главной причиной этих потерь, видимо, следует считать уже не традиционное трение потока о стенку, а вход спиралевидных областей максимальных плотностей потоков момента вращения в пределы границ выходного окна улитки. Эта гипотеза вполне согласуется с нашими данными, которые отражены в локализациях ρ_{min} – максимумов плотности потока момента вращения по двум моделям момента в вихре, особенно справа на рис. 2.

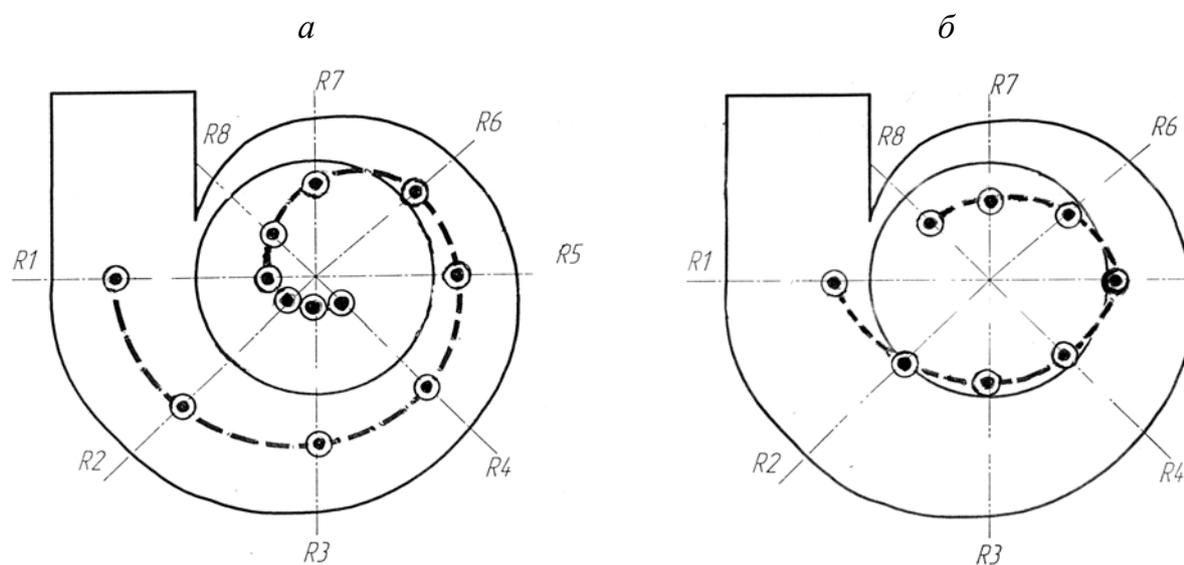


Рис. 2. Локализация максимумов плотности тангенциального потока момента вращения в модели объемного вихря (а) и плотности потока момента вращения в модели плоского вихря (б) – через поперечные сечения струи, развивающейся вдоль боковой стенки улитки

Эти области выноса момента из улитки очевидны, с одной стороны, по правой части рисунка 2, – максимумы потоков плотности момента по его классическому определению (модель плоского вихря) входят под окно улитки, и здесь некоторая доля момента должна неизбежно выноситься из улитки особенно интенсивно. Это подтверждает и правая часть рисунка 3, на котором даны локализации максимумов плотностей потоков момента вращения уже через площадку, которая перпендикулярна торцам улитки или параллельна оси вращения вихря с неизбежным осевым выносом части момента, прежде всего, при повороте струи на радиусах R_7 и R_8 . Эта зона предполагаемого выноса момента из улитки локализована там же, где мы визуальнo наблюдали на прозрачных установках (рис. 1) вынос взвеси.

Активизация и неравномерность выноса момента вращения через окно улитки подтверждает и левая часть рис. 2, которая нам показывает, что роль осевой скорости в области окна улитки очень значительна. Если сопоставить рисунки 2 и 3, то можно увидеть, что зоны отложений взвеси на боковой стенке улитки всегда локализованы именно в тех зонах объема улитки на боковой стенке, где мы выявили выход спирали максимумов плотностей момента вращения по классической и плоской модели вихря в область выходного окна. Здесь эти максимумы плотностей моментов сильнее всего удалены от боковой стенки улитки, локализуясь под окном, они сильнее всего приближены к оси вращения вихря.

В этих областях не только снижается уровень момента вращения у боковой стенки, но также одновременно возникают условия для усиления выноса момента вращения формируемого вихря из улитки через выходное окно. Это, помимо всего прочего, существенно деформирует и сам формируемый улиткой вихрь.

Считаем, что если принять меры по сохранению момента вращения на стенке улитки, особенно в двух показанных нами характерных зонах, то можно сохранить оптимальную структуру вихря, улучшить сепарацию взвеси на стенке и равномернее рассредоточить взвесь вдоль этой стенки. Этим можно ослабить и даже устранить занос улитки при повороте струи на один оборот и снизить или устранить характерный вынос в этом месте уже сконцентрированной и отсепарированной взвеси на стенке улитки.

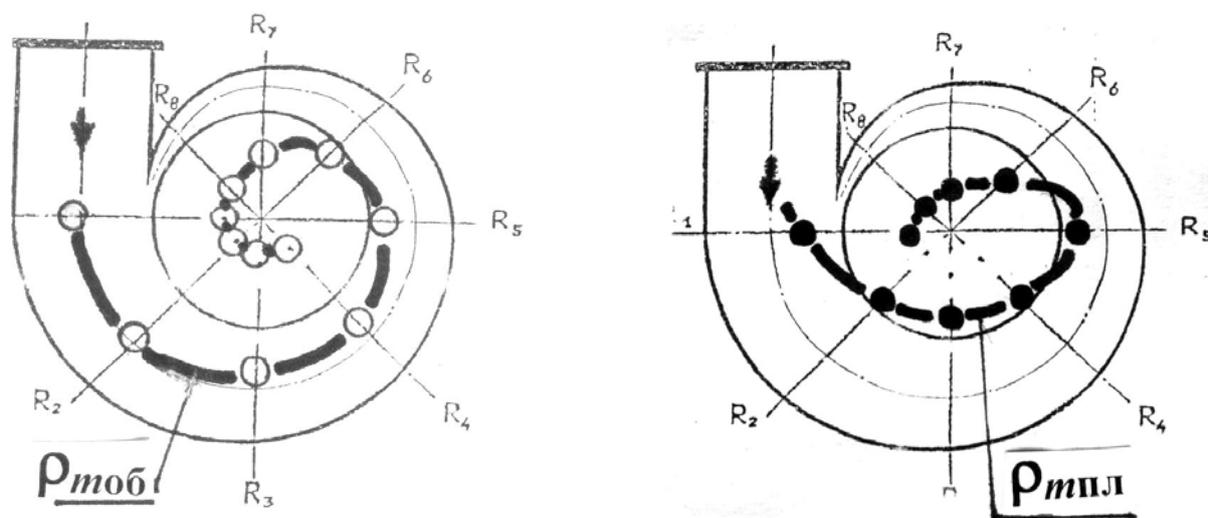


Рис. 3. Локализация максимумов плотностей осевых потоков момента вращения в модели объемного вихря (а) и потока момента вращения в модели плоского вихря (б), идущих параллельно оси вращения вихря перпендикулярно торцам улитки

Эти меры могут быть различны. Нами были опробованы различные изменения геометрических соотношений элементов конструкции улиток и их форм, а также другие, чисто аэродинамические приемы. Одновременно с оптимизацией скоростей потока, вместе с подбором концентрации в нем твердой взвеси, нами предложены варианты завихрителей улиточного типа для закрутки в них двухфазных потоков и организации начала процесса газогенерации биомассы в оригинальных газогенераторах вихревого типа. Причем на практике можно иметь разный набор средств для улучшения аппаратов, как с вертикальной, так и с горизонтальной осью вращения.

Полученные нами ранее экспериментально распределения скоростей, давлений и найденные по ним распределения плотностей потоков момента вращения в двух направлениях отражают механизм выноса твердой взвеси из улитки при повороте в ней струи на 250 – 360 градусов. Отметим при этом, что максимальная плотность потока этого момента в представлениях объемного вихря $\rho_{тоб}$ (рис. 3) никогда не локализуется у стенки улитки. Наоборот, начиная от входного патрубка, она всегда локализована сначала под выходным торцом, но вне границ выходного окна улитки при повороте струи примерно до 200 градусов (рис. 3). Затем эта спиралевидная область максимумов плотности потока объемного

момента вращения скручивается и стягивается к оси вихря вблизи границ приосевого обратного тока при повороте на углы, превышающие 200-250 градусов, но всегда в хоне окна.

Очевидно, что когда эти максимумы плотности момента выходят под выходное окно улитки, то начинается прямой вынос твердого материала из улитки. Максимум выноса установлен нами при повороте струи примерно на 300 – 360 градусов, когда на величину момента вращения в модельных представлениях объемного вихря влияет, прежде всего, осевая компонента вектора скорости W_{zi} , параллельная оси вращения и перпендикулярная торцам улитки. Именно в этом месте объема улитки всегда резко падают значения вращательных скоростей $W_{\phi i}$, и здесь же аномально, примерно в 2 раза возрастают значения скоростей осевых. Здесь очевидна неизбежность осевого выноса материала из улитки – поток газа захватывает взвесь от боковой стенки улитки и выбрасывает ее через ее выходное окно, вдоль оси вращения вихря. Далее, из этого концентрированного потока взвеси, выносимого из улитки, формируется спиралевидный поток вблизи осевого обратного тока вихря и его оси вращения в канале, установленном за улиткой, если диаметр канала соответствует диаметру выходного окна. Если за улиткой нет выходного канала или за ней установлена камера гораздо больших поперечных размеров, то спиралевидный поток взвеси на выходе из улитки раскручивается, и сформированная из него струя уходит далеко в сторону от оси вихря и от выходного окна. Далее, разрушившись в пространстве топки котла, это может вызвать наброс факела на стенку топки, вызывающий обычно местные характерные отложения горящего топлива или его шлака на трубах топочных экранов.

В реальных условиях эксплуатации горелок и топок это вызывает еще и активный абразивный износ участка выходного цилиндра горелки или ее амбразуры, где они встречаются со спиралевидной струей взвеси, а при малой длине цилиндра и недифрагмированной амбразуре вызовет еще и усиление неполноты сгорания топлива. При необходимости снизить неполноту сгорания на практике неизбежно придется повисить местные или общие избытки воздуха в топке. Это неэкономично, и всегда вызывает заметное усиление образования и выбросов NO_x .

Выводы этого нашего исследования позволили предложить комплекс рекомендаций. Это, конечно, увеличение времени пребывания взвеси в улитке и вихревой камере особых, специально подобранных соотношений их размеров, и меры по снижению аэродинамического сопротивления. Одновременно на ряде аппаратов (с горением и без него) удалось заметно снизить несимметричность формируемого вихря (факела) и, главное, – в значительной мере решить проблему вредного и неконтролируемого пока в других конструкциях нежелательного выноса отсепарированной взвеси из аппарата в характерной зоне выходного окна.

Часть этих предложений уже реализована нами в ряде оригинальных аппаратов для вихревой ступенчатой газогенерации, как минимум, трех видов органического сырья (органических отходов) тепловой мощностью аппаратов по горючему газу от 2,5 до 7,5 МВт. Они уже весьма успешно проходят промышленное опробование на трех объектах. На более мелких опытных аппаратах и в горячих моделях тепловой мощностью от 50 до 500 кВт нами опробована газогенерация углей, разнообразной биомассы и их смесей. В том числе нами разра-

ботана и опробована опытная циклонная горелка для весьма широкого ряда твердых топлив и биомассы. В ней реализована частичная газогенерация твердой горючей массы и далее ее управляемое частичное сжигание вместе с частью газов перед их подачей, условно, в топку (в канал отвода газов или их дожигания в лаборатории и сброса в атмосферу). Все данные, полученные при горячем опробовании этой модели, а также и ее аналогов показали нам, что эта, предложенная технологическая схема организации частичной газификации и сжигания твердых топлив, может использоваться для растопки угольных котлов на их же собственной угольной пыли, без использования на них плазмы или растопочных газовых или мазутных горелок.