УДК 532:621.181:621.048

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА МОМЕНТА ВРАЩЕНИЯ В УЛИТКЕ ПРИ ЗАКРУТКЕ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА

Потапов В.Н., Костюнин В.В., Жарков Г.В.

ООО "ВГС", Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Представление формируемого улиткой потока в вихревой горелке или в циклоне, как распределение момента вращения и плотности потока момента вращения, дают возможность определять и устранять на практике области заноса улитки угольной пылью или золой циклона и твердой взвесью центробежного пылеуловителя, а также выявлять и устранять зоны концентрированного выноса угольной пыли и золы, устранять неравномерность распределения золы или пыли в потоке или в горящем факеле. Такое представление позволяет предложить простые приемы повышения эффективности сжигания топлива, снизить избытки воздуха при горении, уменьшить неполноту сгорания угольной пыли и выбросы оксидов азота.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что при закрутке потоков воздуха стандартными улитками и камерными завихрителями горелок котлов, в циклонных топках или в камерах вихревых газогенераторов создаются неоднородные, несимметричные относительно оси вращения, иногда спиралевидные потоки. Закрутка двухфазных потоков камерными завихрителями любого типа часто сопровождается сепарацией твердой взвеси (пыли, золы) в некоторых местах (обычно у боковых стенок и торцов камер) и шлакованием (тех же зон) циклонных топок и вихревых газогенераторов. Все это нарушает структуру вихря в подобных аппаратах и горящих факелов горелок на их основе.

Поэтому горелки с улиточными регистрами для сжигания углей всегда отличаются повышенной неполнотой сгорания, и высоким уровнем избытков воздуха в топке, что не только снижает КПД котла, но и вызывает образование оксидов азота (NO_x). В циклонах или в камерах вихревых газогенераторов могут быстро накапливаться отложения, которые нарушают и далее разрушают всю технологию.

Как ни странно, пока до сих пор нет досточно полного понимания причин характера и механизма образования двухфахных потоков с признаками спиралевидности их структуры в таких камерах, которые, по явно умозрительным представлениям, теоретически должны формировать равномерные, и весьма симметричные двухфазные потоки. Поэтому на практике всегда не хватает средств воздействия на формирование двухфазного вихря, на процессы воспламенения и выгорания топлива в аппарате или в факеле после него. Единственными доступными средствами являются: использование на улиточных горелках многопоточности и набор длинных концентрических соосных каналов подачи воздуха и пыли, каждый со своим завихрителем и с плохообтекаемыми телами на выходе из каналов.

Все это в разной мере относится к циклонным топкам, вихревым газогенераторам и к различным вихревым пылеуловителям центробежного типа. Во многих вихревых аппаратах для пылеулавливания и сепарации твердых частиц наблюдается вынос уже уловленных твердых частиц, которые выносятся из аппарата концентрированно, в виде определяемых визуально двухфазных спиралей. Поэтому многие устройства с камерными завихрителями потоков нередко отличаются пониженной надежностью и малоэффективны при длительной эксплуатации, причем вопреки данным испытаний их малогабаритных моделей, которые были получены ранее в лабораторных уловиях.

НЕКОТОРЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЗГЛЯДА НА ПРОБЛЕМУ

Подробные исследования структуры потока в объеме стандартной улитки на модели простой горлеки, проведенные одним из авторов текста еще в 70-х годах, показали, что эта стандартная, а также практически любая другая улитка или циклонная камера с досточно большим выходным окном, в принципе не может сформировать осимметричный закрученный поток. Многим исследователям известно, что ось вращения вихря при выходе его из аппарата всегда не совпадает с центром выходного окна этого аппарата. Как правило, смещение оси вращения вихря на выходе из улитки обычно происходит в сторону, где поток в объеме улитки, идущий вдоль ее боковой стенки, поворачивается примерно на 160-200 градусов.

В первом приближении это можно объяснить следующим образом. Экспериментально нами было устновлено, что момент вращения потока в улитке формируется не только и не столько в ее входном патрубке, на его срезе, сколько в значительной мере - у боковой стенки улитки или циклона. При развитии струи у боковой стенки происходит характерная деформация этой струи в процессе ее поворота у стенки на угол, наблюдаемый примерно в диапазоне значений от 120 до 230 градусов. Там же у стенки улитки, в наших экспериментах, возрастали на 5-15% тангенциальные скорости в потоке и падало статическое давление. Это должно способствовать деформации всего формируемого вихря в улитке со смещением оси вращения именно в эту сторону и зоны характерного приосевого обратного тока, как показано на (Рис. 1). На этот эффект, конечно, влияют также и форма боковой стенки улитки, и соотношение среднего радиуса входа воздуха в нее и радиуса выходного окна улитки.

Момент вращения, который формируется этой частью деформированной струи, может превышать на десятки процентов значение момента вращения, формируемого потоком газа при входе его в улитку. Интенсивность крутки, найденная по экспериментальным данным о скоростях и давлениях в струе обсуждаемой зоны, может по ходу струи увеличиваться до двух – четырех раз. Однако при этом она обычно всегда в 2 - 4 раза меньше крутки интегральной закрученной струи (потока, вихря) на выходе из относительно короткого цилиндра, в который вихрь поступает из выходного окна улитки. Завершение закрутки всего потока и его формирования, по данным наших ранних работ, обычно происходит уже вне улитки – в начале пристыкованного к ней выходного цилиндра (амбразуры горелки). Поэтому традиционные или стандартные методы расчета интенсивности крутки вихря, формируемого даже страндартной улиткой, не дают нам объективных данных о реальной результирущей интенсивности крутки вихря, который формирует эта улитка, или факела горелки с тем же улиточным завихрителем.

Данные, полученные одним из авторов в 70-е годы, показали, что более реальна интенсивность крутки всего вихря, которая в объеме самой улитки может быть примерно на 20-30% выше, чем та крутка того же потока, рассчитанная из условий входа воздуха в улитку по стандартным или распространенным, досточно условным формулам. Все это указывает на некорректность сравнительных оценок многих характеристик вихревых горелок, а также других аппаратов известными методами, так как это может привести к явно ошибочным решениям при выборе конструкций и назначения вихревых устройств для сжигания или переработки топлив и сырья в разных технологиях.

Анализ этой ситуации убедил нас в том, что она всегда вызвана, как характером формирования, так и особенностями распределения в объеме улитки или циклона момента вращения. Поэтому оценка потока по распределению скоростей и давлений не дает прямых ясных ответов на вопросы, связанные с получением многих технологических эффектов и для устранения недостатков вихревых аппаратов.

В разных циклонах, сепараторах или в вихревых газогенераторах задача существенно усложняется из – за двухфазности и неизотермичности потоков. К тому же отметим, что после области повышения момента вращения потока у стенки улитки при дальнейшем повороте потока на 250 – 300 градусов имеет место весьма быстрое уменьшение момента вращения у стенки. В этой области и начинается быстрая концентрация твердой взвеси у боковой стенки, вплоть до поворота струи на 360 градусов – до уровня среза входного сопла (патрубка) улитки, образуя завал у стенки (Рис.1). Твердая фаза, уже отсепарированная центробежной силой на боковой стенке улитки в даной зоне, выносится из улитки через выходное окно при повороте струи в улитке на 250 – 360 градусов, нивелируя всю практически завершенную до этого в улитке центробежную сепарацию взвеси на стенке улитки.

© Потапов В.Н., Костюнин В.В., Жарков Г.В.

Все эти проявления подробно исследованы на прозрачных холодных моделях, как циклонов, так и камер–завихрителей газогенераторов позже другим автором. Наблюдения на этих моделях убедительно показали нам, что главной причиной нарушения сепарации и заноса боковой стенки улитки (Рис.1) или циклона является быстрое снижение величины момента вращения в этой области. Нами были предложены и опробованы очень простые приемы для устранения заноса стенок взвесью и ее выноса из камеры, а также для рассредоточения взвеси равномерно по длине камеры, как изменением геометрии самого завихрителя, так и аэродинамическими средствами.

Рис.1 Естественные деформации двухфазного вихря в стандартной улитке и на выходе из нее.

При вихревой газификации твердых топлив один из авторов статьи изучал процессы заноса на холодных прозрачных моделях и моделях с горением и газификацией. Заносы и шлакование боковой стенки улитки и похожих камер всегда возникали на двух характерных участках поворота струи, где в наших ранних исследованиях и были отмечены большие потери или снижение момента вращения у стенки камеры. Первая опасная зона – это область поворота струи на 60–110 градусов, и особенно активно заносится учаток, где поворот двухфазного потока достигал в улитках и циклонах 250 – 360 градусов (Рис. 2).

Мощный вынос отсепарированного материала из второй, самой мощной зоны отложений у стенки при завершени полного поворота струи в улитке (на 300 - 360 градусов), всегда был вызван вполне естественным аномальным увеличением осевого потока количества движения (осевого импульса), формируемого улиткой закурченного потока. Даже многократное увеличение скорости газа во входном патрубке (сопле) улитки в опытах, как правило, не приводило к полному устранению этих отложений. Холодные продувки прозрачных моделей улиток и завихрителей камерных типов показали, что только изменение конструкции улитки, лучше, - отдельное аэродинамическое влияние на эту зону аппарата, устранят отмеченный опасный занос, нарушающий технологическую схему вихревого процесса.

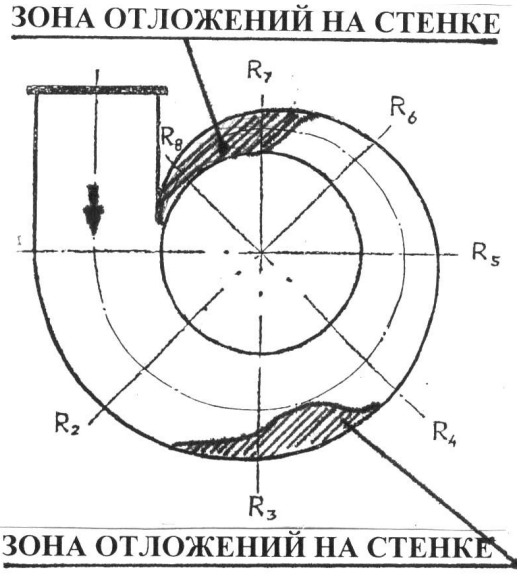

Рис.2 Схема локализации характерных зон отложений твердой взвеси в объеме улитки.

Любые меры устранения зон заноса твердым материалом боковой стенки улитки или подобного завихрителя, и выноса из него концентрированной твердой взвеси положительно отразятся на любой вихревой технологии, причем как с горением, так и в холодных изотермических установках. В основу разработки этих мер, мы приняли предположение о том, что отмеченные негативные эффекты в улитке связаны, так или иначе, с распределением в объеме момента вращения, а также осевого импульса. Пока оценим неоднородность переноса и распределения момента вращения в улитке и его влияние на вынос и сепарацию твердого материала.

Обработка экспериментальных данных показала, распределение момента вращения в улитке крайне неравномерно по радиусу и по мере развития струи в процессе ее поворота в улитке у криволинейной стенки. Далее, процессы турбулентного переноса и определяют все деформации профилей скоростей и давлений в объеме, а не наоборот. На эти процессы, конечно, влияют все геометричесие особенности устройства. Причем считаем, с позиций анализа структуры вихря, формируемого улиткой, более важно рассмотреть в ней распределение не самого момента вращения, а плотности потока того же момента вращения вдоль (иначе параллельно) оси вращения вихря в аппарате. Плотность потока момента вращения, идущего вдоль оси вращения, $m_{\text{об}i}$ мы определили как текущее значение момента вращения элементарного объем вихря, переносимое в единицу времени, через элементарную площадку поперечного сечения вихря f_i, перпендикулярную оси вращения этого вихря:

$$\rho_{m\text{об}} = m_{\text{об}i} / f_i \qquad (1)$$

Величина локального момента вращения здесь определена в представлении вихря, которое мы определяем как модель объемного вихря или объемный вихрь. По аналогии с современными работами этот момент вращения рассчитываем через произведение вращательной скорости и осевой:

$$m_{\text{об}i} = \pi \cdot \rho_i \cdot W_{\varphi i} \cdot W_{zi} \cdot R_i^2 \cdot \Delta R \qquad (2)$$

Текущие вращательные и осевые скорости W_φ и W_{zi} определены в точках измерений зондом на радиусах R_i. Величины P_i и ρ_i – здесь статические давления и плотность среды в тех же точках.

Наряду с моментом и плотностью его потока в представлениях объемного вихря, используем еще и представления о моменте вращения или момента в его классическом понимании. Этот вихрь назовем плоским, так как в нем при определении момента вращения и плотности его потока (условно осевого потока момента вращения или просто момента) мы используем квадрат вращательной скорости:

$$m_{\text{пл}i} = \pi \cdot \rho_i \cdot W_{\varphi i} \cdot W_{\varphi i} \cdot R_i^2 \cdot \Delta R \qquad (3)$$

$$\rho_{m\text{пл}} = m_{\text{об}i} / f_i \qquad (4)$$

Сопоставление распределений в объеме той же улитки плотностей потоков момента вращения в обеих моделях определения момента $\rho_{m\text{пл}}$ и $\rho_{m\text{об}}$ позволяют показать реальные механизмы создания стрктуры вихря - однофазного и двухфазного. Это позволило уточнить механизм образования заносов твердой взвесью двух выделенных участков боковой стенки улитки. Одновременно было показало, что собой представляет механизм нежелательного выноса отсепарированной и сконцентрированной твердой фазы из улитки через ее выходное окно в строго определенном месте, показанное выше на рисунке 1.

СВЯЗЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПЛОТНОСТЕЙ МОМЕНТА ВРАЩЕНИЯ С ВЫНОСОМ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ И ЗАНОСОМ ОБЪЕМА УЛИТКИ

Полученные нами ранее распределения в вихре плотности потока объемного момента вращения $\rho_{m\text{об}}$ по экспериментальным полям скоростей и давлений отражают, а на прозрачной модели и показывают, механизм выноса твердого материала из улитки через выходное окно при повороте струи в улитке на 250 - 360 градусов. Оказалось, что плотность потока объемного момента $\rho_{m\text{об}}$ никогда не локализуется у стенки. Наоборот, начиная от середины входного патрубка, максимумы плотности момента $\rho_{m\text{об}}$ локализованы под выходным торцом вне границ выходного окна улитки при повороте струи до 200 градусов (Рис.3). Затем, спираль максимумов плотности объемного момента вращения $\rho_{m\text{об}}$ скручивается и стягивается к оси вихря у границ приосевого обратного тока при повороте на углы, больше 200-250 градусов.

Очевидно, что когда эти максимумы плотности потока $\rho_{m\text{об}}$ «заходят» под выходное окно улитки, то начинается активный вынос твердого материала из объема улитки. Причем этот максимум выброса будет при повороте струи примерно на 300 – 360 градусов, когда на величину момента вращения в модели объемного вихря влияет, главным образом, не вращательная, а его осевая компонента вектора скорости, то есть компонента, параллельная оси вращения и перпендикулярная торцевым стенкам улитки. Именно в этом месте окна улитки над ее объемом в вихре значительно снижаются значения вращательных скоростей, но при этом в два раза аномально возрастают значения осевых скоростей.

Этим показана очевидная неизбежность осевого выноса из улитки твердой взвеси, захватываемой потоком воздуха от боковой стен-

ки улитки, чтобы затем выбросить эту концентрированную взвесь через выходное окно улитки вдоль оси вращения и формирование далее из этого концентрированного потока выносимой из улитки взвеси.

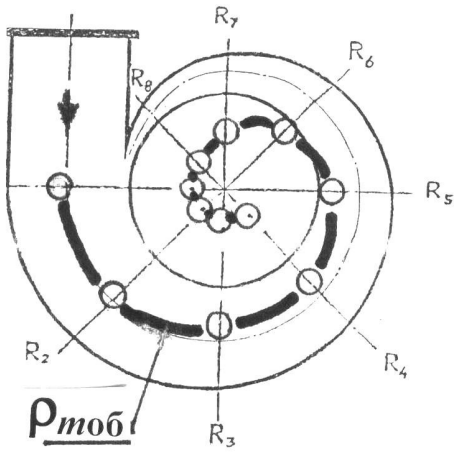

Рис. 3 Локализация в улитке максимальных значений распределений потока момента вращения (в представлениях объемного вихря).

Продувки моделей разных устройств показали, что далее спираль аэровзвеси производит местный наброс потока взвеси на стенку пристыкованного к улитке цилиндрического канала или на амбразуру горелки. В топках угольных котлов это и вызывает абразивный износ именно этого участка выходных каналов и амбразур. При малой длине цилиндра или амбразуры происходит разворот спирали взвеси в топке в произвольно направленную струю. Это может вызвать усиление неполноты сгорания из – за естественного дефицита кислорода при горении в струе взвеси. Для снижения неполноты сгорания на практике неизбежно повышают избытки воздуха в топке. Но это и неэкономично, и всегда вызывает заметное усиление образования и выбросов NO_x.

Эта горящая струя распадающейся спирали горящей взвеси может уходить далеко в сторону от оси вихря, и распространяется в топку котла, часто вызывая наброс этой струи из горящего факела на стенку топки, вызывая местные отложения и даже шлакование труб топочных экранов.

Распределение $\rho_{mi\text{пл}}$ -плотности потока момента вращения в представлениях плоского вихря дает более наглядное понимание характера сепарации взвеси на стенке улитки или циклонной камеры. Первый вывод - эта сепарация неравномерна по длине криволинейной стенки улитки. Второй вывод состоит в том, что в согласии с нашей гипотезой, подтвержденной наблюдениями в моделях разных устройств, отложение взвеси происходит именно в тех двух зонах стенок любой камеры, где имеет место наибольшее снижение или потери вихрем части момента вращения и сильным ослаблением плотности момента вращения $\rho_{mi\text{пл}}$. Локализация же максимальных значений $\rho_{mi\text{пл}}$ согласуется с визуальной картиной концентрации потока взвеси в среднем поперечном сечении прозрачной модели улитки, закручивающей двухфазный поток (Рис 4).

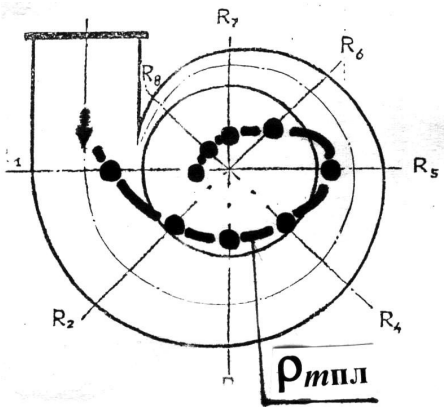

Рис.4 Локализация в улитке максимальных значений распределений потока момента вращения (в представлениях плоского вихря).

Сопоставив рисунки 2 и 4, можно увидеть, что зоны отложений на стенке улитки локализованы именно там, где в вихре локализованы максимумы плотности момента вращения «плоского вихря», сильнее удалены от боковой стенки и приближены к оси вращения в области выходного окна. В этих зонах не только снижен уровень момента вращения у боковой стенки, но одновременно возникают условия для усиления выноса момента вращения формируемого вихря из улитки наружу, через ее выходное окно, деформируя этим и формируемый улиткой выходящий из нее вихрь.

Приняв меры для повышения плотности потока момента вращения $\rho_{mi\text{пл}}$ у стенки улитки, особенно в двух характерных зонах отложе-

ний, вблизи них даже можно сохранять оптимальную структуру вихря, улучшив сепарацию взвеси и рассредоточить ее более равномерно вдоль боковой стенки, ослабив и даже устранив занос стенки вблизи выходного окна при повороте струи в улитке на один оборот, и этим снизить или устранить характерный вынос в этом месте уже отсепарированной на стенке взвеси.

Эти меры могут быть различными. Нами были изменены соотношения размеров конструктивных элементов улиток и их формы, а также и другие, чисто аэродинамические приемы. Одновременно с оптимизацией скоростей потока в улитке, вместе с подбором концентрации в нем полидисперсной твердой взвеси, нами разработан ряд завихрителей улиточного типа для закрутки в них двухфазных потоков и организации начала в них газогенерации биомассы и углей в оригинальных газогенераторах вихревого типа. В разных аппаратах и на разном топливе следует использовать разный набор этих средств - в зависимости от поставленных целей.

Часть этих предложений уже реализована в ряде аппаратов для вихревой ступенчатой газогенерации четырех видов топлива. Их тепловая мощность по горючему газу составляет от 2,5 до 7,5 МВт. Два из них уже весьма успешно проходят промышленное опробование. На мелких опытных аппаратах или горячих моделях тепловой мощностью 50 - 500 кВт нами также опробована газогенерация некоторых углей и разной биомассы. В одной из них нами была реализована газогенерация твердой горючей массы с частичным управляемым сжиганием газа и твердого остатка перед их подачей в канал отвода газов (условно в топку) для дожигания или сброса в атмосферу. Все данные, полученные при горячем опробовании этой модели и некоторых ее аналогов ясно показали нам, что предложенная нами технологическая схема организации газификации и частичного сжигания твердых топлив, может в будущем использоваться для растопки угольных котлов на их собственной угольной пыли, без использования на этих котлах плазмы или традиционных растопочных газовых или мазутных горелок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представление закрученных газовых и пылегазовых потоков через распределения в них момента вращения, а лучше - плотности его потоков в разных модельных представлениях и плотностей потоков этих моментов вращения, переносимых вихрем вдоль, оси позволяют анализировать причины и механизмы вредных отложений твердой взвеси в камерных завихрителях и неконтролируемого выноса из них концентрированных спиралевидных потоков взвеси, ранее уже отсепарированной и сконцентрированной в рассматриваемом камерном регистре. Понимание этих процессов позволяет досрочно просто ослаблять или даже устранять эти негативные явления в практике сжигания твердых топлив, газификации твердой биомассы или в аппаратах вихревой сепарации твердой взвеси в аппаратах с регистрами камерного типа.

© Потапов В.Н., Костюнин В.В., Жарков Г.В.