УДК 621.181:662.921

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ВИХРЕВЫМИ ГОРЕЛКАМИ С НЕРЕГУЛИРУЕМЫМИ ЗАВИХРИТЕЛЯМИ

Потапов В.Н.

ООО "ВГС", Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Предложен новый, видимо, самый эффективный способ управления структурой и круткой любых закрученных потоков в перспективе использования на вихревых горелках для управления их факелами при сжигании разных топлив в топках котлов. Показаны, основанные на данных экспериментов о распределениях скоростей в формируемых вихрях, локализации кольцевых зон усиления и ослабления турбулентного обмена в закрученных потоках при формировании факелов горелок, а также сравнение нового способа управления круткой закрученных потоков, полученных в разных регистров закрутки воздуха, которые применяют на вихревых горелках.

ВВЕДЕНИЕ

Экологичное и экономичное сжигание топлив на котлах ТЭС,- тепловых электростанций, связаны с выбором горелок и их настройкой. Причем нужно оптимизировать всю систему горелки-топка, даже в нее включать сбросные воздушные сопла, если они есть, которые расположены на топочных стенах и установлены над горелками для сброса воздуха в разные зоны топочного пространства. На угольных котлах, в оптимизацию следует включать и систему пылеприготовление. Имеем в виду не тривиальные неэффективные схемы двухстадийного сжигания и более сложные - трехстадийные. Эти технологии при скромном подавления выбросов оксидов азота (NO_x) на практике всегда вызывают снижение КПД котла. Появляется химическая неполнота сгорания q_3, а на угольных котлах, конечно и механическая q_4. Сдерживая рост этих потерь в отработанных схемах, потери КПД от q_3 и q_4 частично снижают увеличением избытков воздуха в топке, вызывая увеличение потерь с теплотой уходящих газов q_2. Эту проблему из скромности обычно обсуждают вскользь или игнорируют, показывая достижения снижения выбросов NO_x. Но по нашим данным, это ухудшение экономики котла даже при сжигании газа после реализации указанных схем, составляет 0,5-1%, а при сжигании угольной пыли – может достичь 1,5-2%, что нежелательно при работе на рынки энергии развитых стран. Причиной снижения экономичности сжигания в топках является то, что горелки ряда котлов при снижении подачи воздуха, не могут сохранять активность перемешивания в факелах до и после возгорания топлива и в тех отдаленных зонах факелов, где формируются все итоговые потери q_3 и q_4. Тепло - массообмен в этих зонах заметно отвечает за рост потерь КПД, где снижаются скорости газов при росте их температур и вязкости. Эффективность перемешивания в этих факелах поддерживает турбулентность, имеющая сложный характер. Изменение крутки потока в горелке и ее индивидуального факела неизбежно влияет на положения в нем зон усиления или ослабления турбулентного обмена при сохранении схем ввода топлива в поток, и конструкции горелки. При этом изменяется активность турбулентного обмена в характерных зонах воздушного потока и в факеле. Проявления этого явления жестко зависит от всей конструкции горелки, ее регистра (регистров) для закрутки воздуха, то есть от настройки регистров. В итоге все зависит от крутки результирующего потока (факела) и от закрутки отдельных потоков горелки, а по нашим данным – и от интенсивности крутки отдельных кольцевых зон потока в горелке и далее - в ее индивидуальном горящем факеле.

© Потапов В.Н.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ВИХРЕВЫХ ГОРЕЛОК

Главный порок горелок 70-80-х годов состоит в установке неуправляемых завихрителей воздуха, то есть регистров. С их помощью невозможно эффективно влиять на степень крутки потоков и далее уже невозможно глубокое изменение структуры и формы факелов. Поэтому нельзя влиять на турбулентный обмен в факелах стандартных (нормализованных) горелок. Причина этой ситуации, последствия которой до сих пор ощущает энергетика – отказ отраслевого законодательства (ОСТ) от установки на вихревых горелках регулируемых регистров. По факту - это запрещение их применения. Сюда же отнесем отказ ОСТ от стабилизаторов горения на выходе потоков из горелок и жесткая унификация их конструкций, размеров и мощности, в том числе, - ограничения допустимых типов завихрителей потоков. Считаем, что эти конструкции горелок, совсем не пригодны для организации эффективных схем экономичного и экологически безопасного сжигания всех топлив.

Эффективные схемы сжигания требуют более сложной, индивидуальной настройки процесса в топках, которые разные авторы и фирмы называют по-разному: например, сжиганием двухзонным или нестехиометрическим, стадийным или ступенчатым вводом воздуха. Эти технологии предусматривают первичное сжигание топлив в несколько стадий с разным в них дефицитом кислорода для управления образованием (подавления) NO_x в группах реакций их образования - быстрых, топливных, термических NO_x. Для этого в факеле горелки нужно управлять и температурой, и газовой атмосферой разных зон. Дожигание топлива вместе с восстановительной атмосферой производится в средней и верхней части топок., требуя гораздо более эффективных аэродинамических схем и тщательного смешения воздуха с вязкими горячими газами в топке при вырождающейся турбулентности в технологически важных зонах факелов горелок и далее - в потоках газов в топке. Реализация этих схем и обеспечит на практике рекордную экологическую безопасность и экономичность топочного процесса, как на лучших ТЭС Европы. Все иные технологии сжигания топлив уже с конца XX века стали совершенно неконкурентоспособны в сравнении со стадийным факельным нестехиометрическим сжиганием.

Все современные технология сжигания топлив в нестехиометрических схемах сжигания в топках связаны, с установкой в каждом случае горелок с особой схемой настройки. Эти горелки называются иногда горелками экологически чистого сжигания (ГЭЧС), которые для полной реализации желаемых целей должны удовлетворять особым требованиям. Выделим некоторые из них, которые, мы считаем, являются самыми важными.

Во-первых, это горелки вихревые, создающие в устье факела осевой обратный ток (внутреннюю эжекцию) закруткой факела, гарантируя надежную стабилизацию воспламенения и полное сжигание топлив в любых режимах, даже при изменениях его качества. Эти горелки могут создавать в отдельных зонах факела усиление или ослабление активности турбулентного обмена. Это условие всегда должно выполняться, иначе не сформировать специальные зоны факела с требуемыми местными избытками воздуха и температурами. Настройка процессов в горелках и их регулирование затруднено.

Поэтому ГЭЧС, во-вторых, должны обеспечить регулирование крутки части, а лучше всех потоков, без чего невозможна оптимизация размеров факела, длина, угол раскрытия и размеры его специальных зон. Кроме того, не воздействуя на перемешивание периферийных зон факелов нельзя влиять на любые характеристики всего факела в топке, на процессы теплообмена по длине газового тракта котла.

В третьих, ГЭЧС должны создать факел заметно пониженной крутки. Длинные факела необходимы для увеличение времени пребывания продуктов горения, содержащих NO_x, в атмосфере СО и H_2 и разном дефиците кислорода. Например, в угольных факелах горение газов пиролиза (летучих) должно идти с недостатком кислорода для их сгорания, для подавления топливных NO_x, сохраняя устойчивость горения при этом,. Создав условия дальнейшего горения топлива и газов при дефиците кислорода на уровне 0,1-0,2 во внешних и участках факелов, можно сильно ослабить образования NO_x, особенно термических,. Тогда образование NO_x практически не зависит (по Рослякову, МЭИ) от температуры, если, по нашим оценкам, она не выше 1200-1300°С.

Снижение крутки факелов до затухания осевого обратного тока может, по данным ряда зарубежных и отечественных работ, усилить турбулентный обмен в протяженной приосевой зоне факела, где при использовании таких регистров, как улитки, без специальных мер происходит резкое затухание перемешивания и усиление неполноты сгорания. Турбулизация

этой приосевой зоны факела любой горелки, считаем особенно полезной для подавления выхода канцерогенов типа $C_{20}H_{12}$ в области горения с недостатком O_2, особенно при местных избытках воздуха у оси, равных 0,4-0,6. Эта зона важна и для экологически чистого сжигания природного газа. При сжигании углей, при определенных условиях можно подавить выход топливных NO_x при малом и даже нулевом выходе быстрых NO_x (из работ П.В.Рослякова и зарубежного опыта). Отметим. в четвертых, что эти вихревые горелки должны иметь дополнительные средства стабилизации горения, иначе их эксплуатация невозможна из-за опасности обрыва факела в режимах подавления NO_x. На лучших ГЭЧС этому служат небольшие конусы, уступы, шайбы и иные плохообтекаемые тела, не вызывающие яного увеличения аэродинамического сопротивления. Эти стабилизаторы являются также дополнительными турбулизаторами отдельных зон горящего факела, в которых рост температур и вязкости всегда ослабляет турбулентный обмен.

Другой прием совместной стабилизации горения и активизации смешения на оси был популярен за рубежом еще 30 лет тому назад. Это установка в центре горелок в потоках воздуха или пыли лопаточного регистра, иногда даже подвижного по оси (горелки Steinmueller, Stork) с радиальными или с наклонными (диагональными) лопатками. Прием применялся ранее и на газовых горелках (Deutsche Babcock, а ныне используется компанией John Zink, и рядом российский специалистов).

В пятых, наряду с регулированием всех расходов воздуха и топлива по каналам горелки необходима осесимметричность всех концентрических потоков. Симметричность потоков может позволить снизить местные избытки воздуха в факела и общие, в топке, обеспечив использования всего потенциала схем позонного подавления и восстановления NO_x, и предельное выгорания восстановительных газов и твердого остатка. Освоение даже минимума этих требований невозможно, следуя устаревшим ОСТ. В них нет ни регулируемых регистров закрутки, ни дополнительных мер по стабилизации горения и активизации в факеле обмена в отдельных зонах, а также средств повышения их симметричности. ОСТ допускает лишь регулирование расходов воздуха и газа в каналах, но не дает управлять смешением, и влиять на размеры зон факела и их взаимодействие. Приведенные нами выше требования достижения безопасного и экономичного сжигания реализуется только в специальных горелках, чьи конструкции противоречат требованиям ОСТ.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКОВ В ОСНОВНЫХ ТИПАХ РЕГИСТРОВ

Выделим три ключевые проблемы. Их следует решить при разработке ГЭЧС. Первая – эти горелки должны обеспечить быстрое, значительное влияние на крутку потоков в горелке и факеле в достаточно широком диапазоне. Вторая проблема, своя для каждой ГЭЧС, - в них нужно создать структуру потока и факела, позволяющую изменять крутку в нужном диапазоне. Третья проблема - все решения технических задач следует решить при минимуме затратах энергии, в пределах возможностей дутья.

При анализе перспектив создания ГЭЧС следует рассмотреть технологии закрутки газа. Если нет длинных цилиндрических каналов на горелке, то структура потока за ней полностью зависит от типа регистра и его геометрии. От этого зависят и крутка потока и ее факела. Разные регистры при сходной структуре потоков и даже одинаковой формально найденной крутки, дают факела разных размеров, форм и аэродинамического сопротивления горелки. При формально одинаковой крутке потока разные регистры отличаются, при сходной структуре вихря разным аэродинамическом сопротивлением.

Известно, что размеры и форма факелов горелок сильно отличаются, указывая на некорректность существующих подходов к анализу горелок при сопоставлении по крутке и по форме факела и по коэффициенту аэродинамического сопротивления.

В любом регистре при закрутке газу сообщают момент вращения, а вдоль оси вращения, условно совпадающей (чаще это не так) с продольной осью горелки, придается осевой импульс. Интенсивность крутки потока и крутку определяют, так или иначе, через отношение суммарных момента и импульса, переносимых в канале и горящем факеле вдоль оси. В безразмерном виде формула крутки содержит также характерный линейный размер. Эту крут-

ку более корректно находить интегрированием полей вращательных и осевых скоростей, давлений, еще и плотности газа в поперечном сечении потока. Этот подход связывают с работами Дубова, Бэра, Чигера Лойцянского, Червинского и других авторов при расчете крутки по сходным формулам.

Подчеркнем, при анализе горелок и их регистров в отечественной практике действительную крутку чаще заменяют условным расчетом ее по геометрии горелки по стандартам (ОСТ), так и нестандартно, - по другим известным методам (Иванов, Найденов, Ахмедов и др.). Расчеты крутки при условных подходах не совпадают со значением интегральной крутки, рассчитанной по экспериментальным полям скоростей, давлений и плотностей газа и в потоке и в факеле. Но независимо от этого противоречия, мы, как и ряд авторов, подчеркнем, что существует ряд регистров, каждый из которых формирует свой поток с важными отличиями. Простейшие регистры основных типов, имеют свой диапазон изменения коэффициентов сопротивления и характеристик факела. Другой особенностью каждого типа регитсра является допустимый диапазон изменения крутки потока, в диапазоне допустимых коэффициентов аэродинамического сопротивления регистров.

Из сходных классификаций регистров горелок, мы, как и многие авторы, считаем, что удобно и корректно принять классификацию работ Ахмедова и Найденова (Рис.1), в которой выделены 1-2 вида камерных регистров и 3 лопаточных регистра: тангенциальные и аксиальные лопатки (ТЛ и А), и АТЛ (аксиально-тангенциальные). Здесь и далее аббревиатуры даны по Ахмедову. Считаем, что тип АТЛ лучше называть диагональным регистром Д, считая, что следует вычленить в классификации еще один тип - циклонный регистр (Ц).

Многие специалисты считают, более успешными регистры А и Д. Оба типа совмещаются в некоем регистра промежуточного вида, напоминающем тип Д, не выделенном специально. При входе воздуха - этот регистр А, а при выходе - регистр Д, из-за сильного скоса кромок лопаток к оси горелки. Этот тип формирует устойчивые, длинные, хорошо стабилизированные факела, с хорошими условиями смешения до и после воспламенения топлива. К этим регистрам отнесем конструкции центральных регистров стандартных российских горелок на газе и многие горелки зарубежных фирм, в том числе и для сжигания угольной пыли.

Другой удачный пример, - центральный регистр Д рекордных горелок для камер сгорания газовых турбин «Siemens» (серия «3а»). Мы также имеем удачный опыт разработки и внедрения точно таких же регистров. Они созданы нами в 1985 году для особых вихревых газовых горелок с аномально длинными, но устойчивыми и слабо закрученными высоко турбулентными факелами, с сохранением осевых обратных токов при снижении крутки ниже предела, при котором обычно происходит обрыв факела при схлопывании осевого обратного тока. Эти горелки показали рекорд аэродинамического сопротивления (200 Па), успешно работая в топке циркулирующего кипящего слоя опытного котла, пущенного в 1991 году в котельной бывшего УПИ. Регистры этих горелок оказались геометрически подобными осевым регистрам упомянутых горелок «Siemens», поступивших на рынок в том же году.

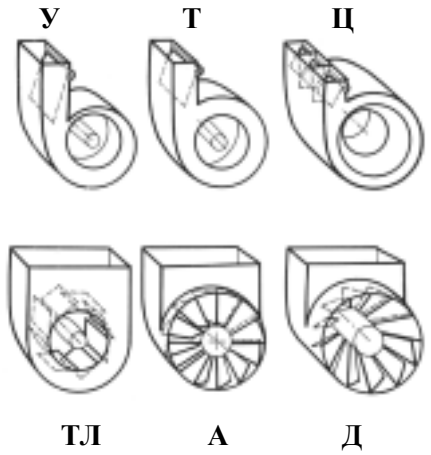


Рис.1 Основные типы регистров, применяемых для закрутки воздуха на горелках разных типов.

Необычные параметры горелок опытного котла связаны с принятием в них разработанного нами и исследованного впервые совсем нового способа влияния на крутку и структуру вихря, который обеспечил устойчивое, надежное воспламенение газа и полное его сгорание при аномально низком сопротивлении горелки по воздуху и радикально низкой крутке ее факела. Иная ситуация связана с регистрами У и Т, имеющими очень надежную стабилизацию горения и активное смешение на периферии факела, но плохое смесеобразованием у оси факела. Этот порок регистров У и Т устраним при фор-

мировании факела циклоном (тип Ц). Это диафрагмированная камера, отчасти, подобная Т и У. Тип Ц принципиально самостоятельный, так как он формирует поток постоянной структуры, но при заметном изменении крутки потока в циклоне. Во- вторых, в регистрах Ц ослаблен другой порок регистров Т и У – несимметричность потока на выходе. Но регистры Ц не нашли пока широкого применения. К ним отнесем удачные циклоны разработки ДВПИ и выходцев из него или мазутные горелки для малых котлов производства компании John Zink. Недостатком всех камерных регистров является низкий диапазон регулирования крутки языковыми шиберами в их входных патрубках. Но манипуляций шиберами на практике избегают, ибо уменьшение сечений сопел шибером вызывает быстрый, часто недопустимый рост сопротивления. При этом за регистрами У и Т (в отличие от Ц) возрастает и без того высокая неоднородность скоростей в потоке за регистром и несовпадение оси вращения потока с осью устройства.

Считаем, что регистры ТЛ, а особенно - А и Д создают симметричные потоки. Их преимуществом является и возможность регулировать крутку в весьма широком диапазоне, особенно в регистрах типа ТЛ. Однако усиление крутки регистром А сильно повышает аэродинамическое сопротивление горелки, ограничивая этим регулирование крутки. Наибольшие ограничения имеют регистры Д, а в меньшей мере - ТЛ. Регистры Д для регулирования крутки факела неприемлемы. В них очень трудно или невозможно обеспечить поворот диагональных лопаток, в кольцевых каналах. Поэтому одни лишь регистры Д не пригодны к регулированию факелов из-за отмеченного ограничения, а также из-за увеличения аэродинамического сопротивления при сильном увеличении крутки. Поэтому регистры А и Д не следует применять для формирования сильно закрученных коротких факелов с большим углом раскрытия и широким приосевым обратным током.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРУЙНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗАКРУЧЕННЫМ ПОТОКОМ

Все перечисленные проблемы основных типов регистров почти полностью разрешаются в рамках приемлемых аэродинамических сопротивлений и высокой надежности эксплуатации, применением нового, оригинального способа управления круткой и структурой потока. Этот способ исследован нами, видимо впервые, в разное время, начиная с 1977 года, на холодных моделях горелок. Среди них полно исследована модель простейшей горелки с этим способом управления. Ее модель состояла из нерегулируемой стандартной улитки с выходным каналом, длина которого соизмерима с диаметром, а стенка канала по всей длине была равномерно перфорирована отверстиями. Через эти отверстия в вихрь после улитки вдувался воздух в виде радиальных воздушных струй. Суть управления состоит в изменении скорости вдува струй через стенку. Скорости этих струй обычно соизмеримы со скоростями основного потока (вихря), идущего по каналу за улиткой. Струйный радиальный вдув (СРВ) разной интенсивности оказался чрезвычайно эффективным средством управления закрученным потоком, вызывая сильную, глубокую перестройку его структуры во всем объеме вихря. Управляющий СРВ изменял интенсивность крутки потока (вихря) в модели и на выходе из нее на порядок. Если сопоставить глубину воздействий СРВ на вихрь и поворот лопаток и шиберов у обычных типовых регистров, получатся гистограммы на (Рис. 2). Изменения крутки потока управляющим СРВ было получено несмотря на то, что все узлы горелки были неизменны и неподвижны. Из сопоставления этих возможностей управлять круткой потоков за регистрами основных типов, собранными нами из работ известных авторов и наших экспериментов (СРВ-ПЦ за У) видно, что воздействие СРВ на действительную крутку Θ потока на выходе из перфорированного цилиндра за улиткой (СРВ-ПЦ), является более эффективным. Изменение интенсивности СРВ было определено нами интегрированием реальных полей скоростей, давлений и плотности воздуха, которые нами были получены экспериментально.

Для иных случаев вместо действительной крутки на рисунке представлены значения конструктивной крутки n, которую на практике не определяют, а рассчитывают по стандартным или иным формулам по геометрическим характеристики регистров. Черные части гистограмм отражают возможные для практики изменения крутки при коэффициентах аэродинамического сопротивления не более 6-6,5. Незаштрихованные,

белые участки соответствуют крутке, при которой обратный ток на оси вихря не образуется. Это опасные режимы обрыва факела, и они не допустимы. Заштрихованными наклонными линиями показаны участки, которые показывают возможности изменения крутки, но достижимые лишь при росте коэффициента аэродинамического сопротивления выше значений 6-6,5. Это нереально для котлов ТЭС, так как связано с ростом затрат энергии на дутье или возможностями дутьевых средств. Самые распространенные коэффициенты сопротивления газовых горелок обычно не выходят за пределы значений 2,5 – 3,5, а у отдельных потоков угольных горелок обычно не превышают значений 3,5–6,5. Реальный рабочий диапазон часто на практике даже ниже того, что соответствует зачерненным участкам (Рис. 2). Исключением является только лишь полученный нами опытный диапазон для опытной горелки СРВ-ПЦ, который превышает возможности всех известных регистров.

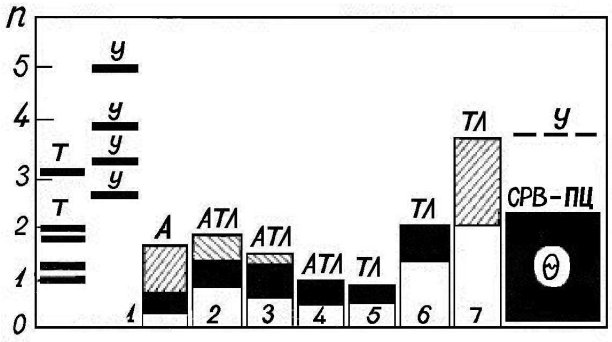


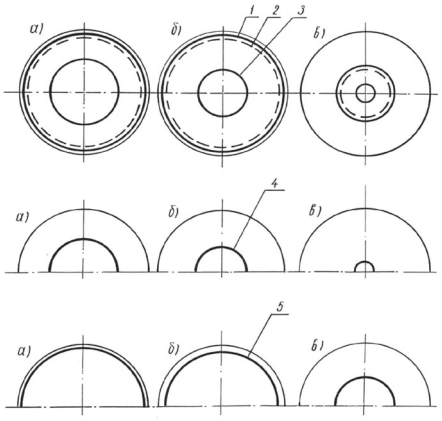
Рис.2 Реальные и возможные диапазоны изменения конструктивного параметра крутки n для основных типов регистров, а также реальной крутки потока на выходе из улиточной горелки управляющим СРВ в выходном цилиндре.

Интенсивность управляющего СРВ положена нами как относительный радиальный импульс струй вдува в отверстиях перфорации цилиндра. Это среднерасходный радиально направленный импульс всех струй СРВ в отверстиях перфорации стенки выходного канала, отнесенный к осевому интегральному среднерасходному импульсу всего результирующего закрученного потока на выходе из модели, рассчитанный интегрированием полей скоростей и давлений, полученных в опытах:

$$k = K_{вд}/K_{вых}$$

Величина k – изменение интенсивности (параметра) вдува. В нашей работе k изменялась значительно (от 0 до 1,1) и была на 1-2 порядка выше, чем при организации вдувов через проницаемые (пористые) стенки в аппаратах аэрокосмической отрасли. Одним изменением интенсивности СРВ (параметра вдува) через стенку нами было получено изменение крутки потока на порядок в устройстве неизменной геометрии. Другим крайне важным результатом воздействия СРВ на поток является необычно сильная деформация в объеме горелки и на выходе из нее структуры закрученного потока. Причем в деформированных потоках полностью сохранялись все особенности структуры - порядок следования радиусов зон вихря, которые в разном наборе, определяют место максимумов и нулевых значений составляющих вектора скорости, нулевых значений давлений и других. В теоретических моделях и инженерных расчетах используют также радиусы локализации зон характеристик турбулентного обмена. Анализ известных источников показывает, что никакими другими способами, кроме СРВ, не получить деформацию закрученного потока с сохранением его структуры. Таким образом, СРВ через стенку выходного канала способен любую стандартную нерегулируемую вихревую горелку превратить в регулируемую с широким диапазоном регулирования. Использование СРВ способно в обычной горелке усилить разделение потока на зоны разной интенсивности турбулентного обмена, превратив ее в специальную экономичную горелку экологически чистого сжигания (ГЭЧС), Воздействие СРВ на турбулентные характеристики (в нашем случае они получены расчетным путем с использованием ряда простейших традиционных моделей) показали, что с помощью СРВ можно регулировать процессы смешения в потоке и в формируемом факеле в топке. Нами было уточнена локализация в наших потоках зон повышенных и пониженных значений коэффициента турбулентной вязкости и некоторых компонентов напряжений турбулентного трения, участвующих, например, в переносе момента вращения по радиусу потока. Эти характеристики качественно мо-

гут объективно отражать активность перемешивания в ряде зон потока и в горящем факеле. Анализ положения этих зон в потоке в сочетании с анализом схем ввода топлива позволят оптимизировать воспламенение и горение топлива в разных областях объема факела. Это важно для снижения неполноты сгорания при создании схем нестехиометрического стадийного сжигания для схем радикального подавления NO_x. Распределение в факеле зон разного дефицита кислорода является при температурах ниже 1200-1300°С главным и пока самым эффективным в мире способом радикального снижения выбросов NO_x на котлах ТЭС. Нами установлено, что СРВ является также простым средством управления положения зон усиления и ослабления в потоке турбулентного перемешивания. Анализ известных горелок и разработка горелок ГЭЧС, показали, что важно знать положение хотя бы трех характерных зон потока (вихря). Первая зона, - это зона на периферии потока с радиусом R_k (радиус максимумов осевого импульса). Здесь повышен уровень турбулентного обмена. Известно, что даже без СРВ это новостью не является. Новым является то, что включение и усиление СРВ отодвигает эту зону от стенки в сторону оси потока и усиливает активность обмена, так как происходит струйная турбулизация вдувом этой зоны. На практике это позволит управлять интенсивностью процессов на периферии факела, позволив влиять на размеры периферийных зон планируемых стадий выгорания топлива. В факеле целесообразно использовать вторую зону - область затухания турбулентного обмена, происходящего даже при усилении с помощью СРВ турбулентного обмена в центральных и в периферийных областях факела. Видимо, нами было впервые установлено, что эта зона ослабления турбулентного обмена совпадает с локализацией в вихре с зоной нулевых значений радиальной компоненты вектора скорости ($W_r = 0$), где радиальная скорость W_r меняет свое направление на противоположное. Эта граница расширяющейся и сужающейся областей любого закрученного потока (вихря). Радиус R_{r0} этой зоны всегда меньше радиуса зоны максимальных осевых скоростей, но больше радиусов зоны максимумов вращательной скорости, а также больше и радиусов нулевых значений полных давлений R_{h0}. Нами было установлено, что СРВ сильно влияет на радиус этой кольцевой границы $W_r = 0$.. При желании можно уменьшать ее радиус усилением интенсивности управляющего СРВ (Рис. 3). Третья, крайне важная на практике зона - это кольцевая зона центральной турбулизации вихря. Нами уточнено ее положение, которое всегда совпадает с радиусом локализации максимумов радиальных скоростей R_r этой расширяющейся зоны вихря, причем самого интенсивного, где происходит и самое активное взаимодействие осевого обратного тока с основным вихрем, выходящим из горелки.



$k = 0$; $k = 0{,}52$; $k = 0{,}91$.

Рис.3 Локализация в вихре областей повышенной и пониженной активности турбулентного обмена, а также нулевых полных давлений и максимумов осевых скоростей при воздействии СРВ на вихрь: *1 – R_k; 2 - R_{r0}; 3 - R_r; 4 – R_{h0}; 5 – R_z.*

Управляющий СРВ все эти процессы активизирует, уменьшая и радиус этой зоны, приближая ее почти к самой оси вращения. Но этот радиус остается всегда на 10-15% больше радиуса внешней границы обратного тока. Этот факт считаем важным при оптимизации схем центрального ввода топлива и его сжигания. На рисунке 3 показано изменение радиусов обсуждавшихся зон при трех значениях СРВ разной интенсивности.

Отчетливо видно что управляющий СРВ через стенку выходного канала радикально расширяет возможности реализации схем экономичного и экологически безопасного сжигания разных топлив.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный и впервые исследованный нами способ воздействия на интенсивность крутки и структуру закрученного потока превосходит по своим возможностям все известные способы управления закрученными потоками при их формировании изменением геометрических соотношений элементов конструкций типовых регистров для закрутки газов (воздуха). Это открывает совершенно новые возможности для создания горелок экологически чистого высокоэкономичного факельного сжигания энергетических топлив. Новый способ управления вихрем – струйный радиальный вдув газа (воздуха) через стенку цилиндрического канала горелки позволяет усилить разделение закрученного потока на зоны усиления и ослабления турбулентного обмена и на размеры этих зон. Это полезный и крайне дефицитный механизм для создания в горящем факеле зон с разной атмосферой и температурой при реализации стадийного сжигания топлив в нестехиометрической атмосфере.