

УДК 532

О неоднородности закрутки выделенных зон потока в поперечном сечении технического аппарата

В.Н. Потапов, В.В. Костюнин, А.В.Копейка

ООО «Вихревые системы», Екатеринбург, Россия

Для повышения эффективности работы устройств, использующих закрученный газовый поток, представлено распределение интенсивности крутки в поперечном сечении этого потока.

About Heterogeneity of intensity of a whirlwind of the allocated zones of a stream in cross - section stction CROSS-SECTION SECTION OF THE TECHNICAL DEVICE

V.N.Potapov, V.V. Kostjunin, A.V.Kopejka

Open Company «Vortical systems», Ekaterinburg, Russia

For increase of an overall performance of the devices using the twirled gas stream, distribution of intensity of a whirlwind in cross-section section of this stream is presented.

При разработке вихревых устройств и при анализе в них теплообмена и массопереноса постепенно сложился относительно сходный подход к оценке интенсивности закрутки или просто крутки потоков в таких аппаратах. Как правило, авторы работ оценивают некую условно, общую, точнее интегральную крутку потока или вихря. Явно, а иногда неявно, эту крутку полагают как отношение интегрального, полного момента вращения закрученного потока (вихря) к его интегральному осевому импульсу в поперечном сечении аппарата или в любом сечении потока, перпендикулярном его же оси вращения (того же самого вихря). При этом обычно игнорируется гораздо более сложная и более важная для практики проблема – сильная неоднородности закрутки отдельных областей любого рассматриваемого вихря в некоторых его заранее принятых границах. За эти границы всего вихря чаще всего полагают внешние границы канала, по которому идет поток, или границы выходного окна устройства. Границы отдельно выделенных зон потока можно устанавливать по некоторым условным поверхностям, представляющим для исследователя интерес. Например, - это внешняя граница приосевого обратного тока, определяемая как условная поверхность нулевых осевых скоростей ($W_z = 0$).

Формирование собственно крутки всего интегрального газового вихря, считаем, есть следствие распределения в потоке осевого импульса или количества движения и тем же потоком переносимого вдоль своей оси момента вращения или момента количества движения. Главным механизмом распределения в объеме вихря импульса и момента, конечно, являются механизмы турбулентного обмена, конечно с учетом истории вихря, геометрии аппарата и режима течения. Причем изучение сильно закрученных потоков в технических устройствах позволяет предполагать, что к разным зонам объема одного и того же вихря приложимы разные модельные представления о турбулентном обмене. Считаем, что это одна из причин, поэтому на практике эти потоки (вихри) могут сильно отличаться в устройствах разных типов, а противоречия представлений о структуре

закрученных потоков с устойчивым приосевым обратным током тормозят развитие единого взгляда и общей системы описания инженерных приложений турбулентных сильно закрученных потоков применительно к реальной практике.

В явном или скрытом виде крутку или интенсивность крутки полагают отношением момента вращения потока к его осевому импульсу в поперечном сечении аппарата или в сечении, перпендикулярном оси вращения. Причем часто различаются представления об осевом импульсе и моменте вращения, переносимых потоком. Подходы к оценке самого параметра или числа крутки также могут отличаться. Чаще всего в последние десятилетия в инженерной практике используется безразмерное выражение вида:

$$\Theta = \tilde{N}\dot{I} / D\hat{E} \quad . \quad (1)$$

Символ Θ в данном случае нам просто привычнее, хотя используются и многие другие обозначения. Размерную характеристику D обычно приравнивают к диаметру аппарата или его выходного окна, а коэффициентом C сближают расчетные и экспериментально установленные значения параметра крутки. Главное, конечно, при таком подходе, - это принятие модели представления о моменте вращения интегрального потока M и его осевого импульса K . Представления об импульсе и моменте также отличаются у разных авторов. Поэтому публикуемые материалы часто несопоставимы или непригодны для анализа разных аппаратов сходных аэродинамических схем.

В инженерной практике, а также в физике атмосферы, при определении крутки вихрей (закрученных струй) есть наиболее корректные представления, - по два для момента и для импульса. Для более корректных представлений моментов, переносимых вихрями чаще всего встречаются выражения:

$$M_{\varphi z} = 2\pi \int_{r=0}^R \gamma r^2 W_{\varphi} W_z dr . \quad (2)$$

$$M_{\varphi\varphi} = 2\pi \int_{r=0}^R \gamma r^2 W_{\varphi}^2 dr . \quad (3)$$

где $M_{\varphi z}$ и $M_{\varphi\varphi}$ – интегральные моменты вращения закрученных потоков в двух, разных модельных представлениях о вихре. Величину $M_{\varphi z}$ более точно следовало бы называть осевыми потоками момента количества движения (ПМКД). Причем, W_{φ} – вращательная скорость (тангенциальная составляющая полного вектора скорости), а также и осевая скорость W_z (аксиальная составляющая полного вектора скорости), как и γ – плотность среды измеряются или полагаются в одной и той же точке потока на текущем радиусе r , а R – это радиус внешней границы потока (например, стенки канала или выходного окна горелки). Первый вихрь, в котором переносимый момент вращения $M = M_{\varphi z}$ (2) условно назовем объемным вихрем, а второй вихрь, интегральный момент вращения которого обозначен нами как $M = M_{\varphi\varphi}$ (3), назовем далее плоским вихрем.

Интегральное, направленное параллельно оси вращения потока количество движения (осевой импульс) того же самого вихря, в разных инженерных или в аналитических работах чаще всего представлен в основном в виде двух моделей:

$$K = 2\pi \int_{r=0}^R r(\delta + \gamma W_z^2) dr; \quad (4)$$

$$K = 2\pi \int_{r=0}^R r\gamma W_z^2 dr \quad (5)$$

K – осевой (направлен вдоль оси вращения вихря) интегральный импульс или осевой поток количества движения (ПКД) закрученного потока (вихря); p – текущее значение статического давления в точке потока на радиусе r , где уже были определены величины W_ϕ , W_z и γ . Выражение 5 для определения ПКД сегодня используется весьма редко. Мы также обычно, как и в данном тексте используем выражение 4, содержащее распределение статического давления p в закрученном потоке, в точках на радиусах r . Это выражение, на наш взгляд, более удачно и корректно отражает ряд специфических процессов формирования объемных вихрей в реальных технических аппаратах, прежде всего в вихревых горелках котлов и печей, а также в камерах сгорания газовых турбин или в вихревых поточных газогенераторах. В литературе можно встретить и другие, отличающиеся выражения типа 2, 3, 4 и 5, но для нас это сегодня пока неактуально.

Что касается ПМКД (для удобства - просто момента вращения), то оба выражения 2 и 3 несмотря на принципиальное физическое различие для инженерной практики можно считать условно равнозначными и относительно верными. Однако их выбор должен быть регламентирован при анализе разных вихревых устройств, а к их использованию следует подходить очень осторожно, исходя из реальных задач. Этот подход может показаться нелогичным, так как формулы 2, 3 отражают разные представления о вихре, и при описании сильно закрученных потоков в одинаковых аппаратах оба описания обычно дают количественное расхождение на порядок. Но качественно величины, найденные по формулам 2 и 3, изменяются сопоставимо при анализе регулируемых вихревых аппаратов одного типа. Это проверено нами на разных устройствах - в улитке и в цилиндрическом канале на выходе из модели горелки. Не вдаваясь в анализ этой принципиально важной проблемы, ответим, что для технического анализа камерных регистров (циклонов, коротких вихревых камер, улиток) и регистров с вытянутыми радиально узкими тангенциальными лопатками гораздо адекватнее выражение типа 3. Но для осевых или диагональных лопаточных регистров, или индивидуальных факелов горелок и атмосферных вихрей (смерчей, циклонов) – удачнее и корректнее формула 2. Она, видимо, и пришла в технику из физики атмосферы, а также используется при анализе вихревых пелен от концов плоскостей летательных аппаратов. Во второй, «плоской» модели момента вихря поток движется в основном в плоскости вращения, и уровень значений вращательных скоростей в основной части вихря в разы или даже на порядки выше значений скоростей осевых. Модель «объемного» вихря (его момент определен по формуле 2), напротив, отличается очень сильным осевым движением газа (осевым стоком). Поэтому она не содержит принятый в ранних (но в классических работах по вихрям) квадрат значений вращательных скоростей. Вместо него эта модель включает произведение скорости вращательной на скорость осевую.

Однако наш опыт убедительно показывает, что сопоставление значений моментов или крутки потоков через моменты, вычисленные по 2 или 3, очень затруднено в случаях, представляющих особый интерес для инженеров, когда в реальном устройстве один из выделенных нами типов вихря переходит в другой. Такое явление, по нашим данным,

типично и часто является причиной некорректных оценок крутки реальных газовых потоков на практике, когда фактически оказываются несопоставимыми расчеты и даже результаты экспериментального определения крутки газовых интенсивно закрученных потоках в вихревых аппаратах разных типов. Например, это может быть реально при сравнении течений в лопаточных регистрах тангенциального или диагонального типа, а также при анализе развития вихря в камерных регистрах, особенно с переходом вихря в цилиндрический канал или в некий объем, например из горелки в топку.

При изучении подобных объектов мы неоднократно наблюдали в центральной части улиточного регистра превращение вихря плоского типа в вихрь, обозначаемый нами как объемный. При этом расчет крутки газа в подобном регистре по одной формуле момента, часто оказывается некорректным для расчета крутки того же потока в канале за тем же регистром или в затопленном пространстве. Крутка потока, рассчитанная с помощью модели объемного вихря (формула 2) на выходе из канала, может более чем в 2 раза отличаться от величины параметра крутки того же потока, но оцененной по классическим модельным представлениям о плоском вихре или по рекомендациям стандартных методик технических расчетов вихревых устройств. В этих документах часто в неявном виде использована крайне упрощенная модель плоского вихря. В то же время крутка потока в объеме улитки (кроме ее приосевой зоны), рассчитанная по модели плоского вихря (формула 3), может в несколько раз отличаться от крутки, если ее рассчитать по формуле официального норматива (условно модель плоского вихря).

Другой, более глубокой и пока несправедливо игнорируемой причиной некорректности сравнений интенсивности крутки потоков (вихрей) в различных устройствах является, на наш взгляд, неодинаковый характер распределения интегральных величин M и K (как бы они ни определялись) в поперечных сечениях аппаратов или в закрученных потоках в затопленном пространстве. Причем и установление границ интегрирования импульсов и моментов в объеме этих вихрей, для которых определяется значение числа крутки, отличаются в разных системах представления и в расчетных моделях, а также в разных устройствах в зависимости от целей исследования в них закрученных потоков. Поэтому всегда противоречивы оценки конструкций вихревых устройств и очевидна неопределенность при выборе оптимальных режимов течения в них газов. Вследствие этого фактически изъят из современной инженерной практики последнего времени ряд традиционных устройств камерного типа, например, улиточных горелок или некоторых сепараторов в пользу устройств с лопаточными регистрами осевого типа.

Выделим два признака некорректности в подходах оценке крутки потоков, которые приводят к таким последствиям. Во-первых, в рамках любого единого, формального подхода к оценке крутки, разные регистры формируют потоки разной структуры, но при одних и тех же значениях самого числа крутки. Во-вторых, аэродинамическое сопротивление тех же регистров может отличаться в разы при одинаковом формально рассчитанном параметре крутки. Поэтому при использовании подобных формальных приемов реальная инженерная практика диктует использование принципиально разных типов завихрителей воздуха при одинаковых значениях крутки формируемых потоков, например, на стандартных горелках котлов тепловых электростанций при организации более эффективного сжигания разных видов органического топлива.

Реальные технологические задачи вынудили нас попытаться оценить неравномерность закрутки объема закрученных потоков и внести уточнения для корректного выделения (формального установления) внешних границ вихря. На исследованной нами модели

вихревой горелки с широким диапазоном регулирования крутки и структуры потока (факела горелки) крутка этого потока изменялась в десять раз при сохранении условий стабилизации горения топлива, причем при весьма низких значениях коэффициентов аэродинамического сопротивления. Одновременно наблюдалось сильное изменение локализации в объеме потока, ограниченного стенками выходного канала, характерных зон так называемого квазипотенциального и квазитвердого вращения (ЗКПВ, ЗКТВ), а также и внешней границы приосевого обратного тока (ЗПОТ). Расчеты показали, что у самых внешних границ как ЗКВП, так и ЗПОТ, снаружи, достигают максимальных значений ряд важных турбулентных характеристик. Причем при изменении крутки интегрального потока на выходе из модели горелки в широком диапазоне (в 6 - 7 раз), совершенно не изменялась крутка центральной части объема вихря, включающая в себя ЗКПВ, ЗКТВ и ЗПОТ. Но при этом, одновременно крутка ЗПОТ и периферии потока (снаружи, вне границ ЗКПВ) изменялась так же, как и крутка всего интегрального вихря, а в основной части кольцевой области потока внутри ЗКПВ крутка потока газа изменяла в ряде режимов свое направление даже на противоположное. Это непривычно для традиционных подходов к оценке крутки в инженерной практике, и явно указывает не только на неодинаковость закрутки отдельных зон потока (вихря) в зонах с разным законом вращения, но и на смещении внешних границ отдельных зон вихря и место его внешней границы. Учет этого оказался принципиально важным, в том числе и при организации эффективного управления потоком в данной вихревой горелки, а также при оптимизации ввода топлива в воздушный поток для более эффективного сжигания.

Для оценки послойного изменения интенсивности крутки отдельных слоев объемного газового вихря (с мощным осевым стоком) при анализе новой конструкции вихревой горелки нами были предложены и опробованы несколько вероятных параметров или чисел для количественной оценки локальной (местной, текущей, послойной) крутки. В итоге нами было предложено, с нашей точки зрения, наиболее удачное выражение:

$$\omega_f = 2 \rho_m / \rho_k \quad (6)$$

Текущая крутка ω_f - это интенсивность крутки элементарной части вихря относительно его единой продольной оси вращения. Эта элементарная часть вихря, проходящая через элементарную площадку f поперечного сечения вихря, в нашем случае имеющую вид полукольца. Интегрирование величины ω_f в некоторых определенных и необходимых границах позволит определять интенсивность крутки отдельных зон вихря, причем в масштабе, сопоставимом со значением параметра крутки, рассчитанной для всего вихря в любом варианте использования формулы 1. При оценке процессов переноса в вихре и сильной неравномерности закрутки газа в устройстве считаем продуктивным анализ распределений в вихре величин ρ_k и ρ_m . Это плотности осевого потока момента количества движения ρ_m (или проще - плотность потока момента), и плотности осевого потока количества движения ρ_k (или проще - плотность потока осевого импульса):

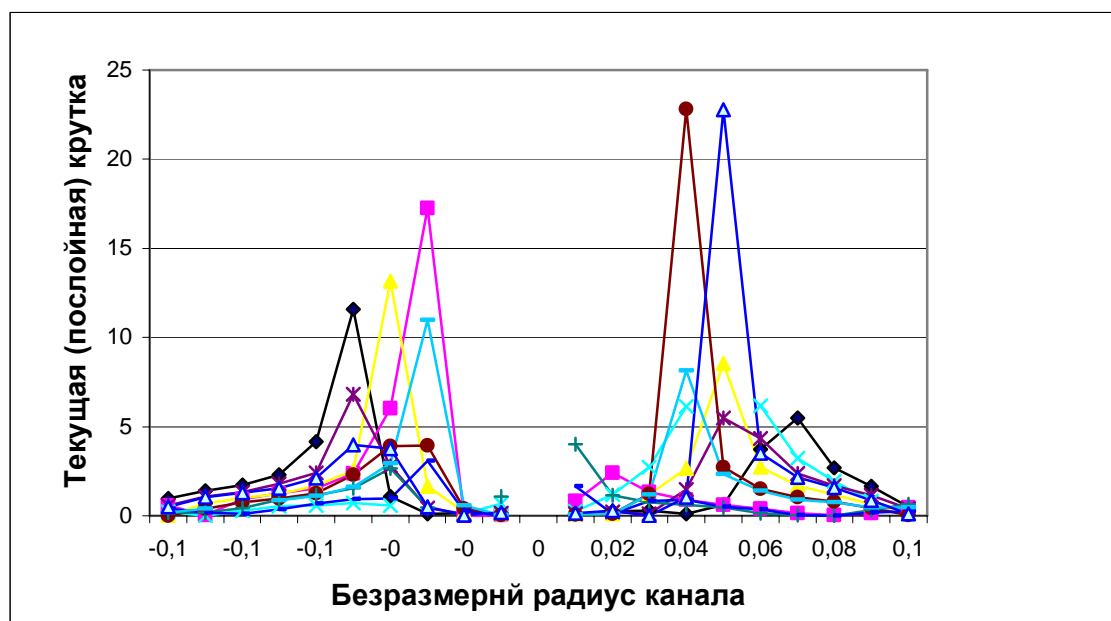
$$\rho_k = k / f \quad (7)$$

$$\rho_m = m / f \quad (8)$$

Здесь величины k и m - это элементарные или частичные потоки количества движения и момента элементарной части вихря, проходящие через часть его поперечного сечения элементарной площадью f (при любом модельном представлении M или K).

Величина ρ_k была, видимо, впервые введена в отечественную практику Л. Вулисом. Она часто полезна для выявления в потоке характерной зоны усиления турбулентного переноса на крайней периферии потока или в горящем факеле горелки.

Новая, непривычная пока величина ρ_m введена ранее (видимо, впервые) В. Потаповым в конце 70-х годов для анализа сильно закрученных потоков в горелках и циклонах, в частности для определения внешней границы характерной квазипотенциальной области вихря, которую в ряде задач можно использовать в качестве внешней границы вихря. В пределах этой границы в ряде устройств сохраняются некоторые характеристики вихря при изменении интенсивности крутки. Эта граница может быть полезна также и для определения в вихре некоторой внутренней, узкой области, где возможно ослабление турбулентного обмена. Наличие этой области раздела двух зон вихря (внутренней расширяющейся и внешней, ее сжимающей) принципиально важно при формировании в факелах вихревых горелок областей с разной химической атмосферой. Это важно для внедрения более эффективных современных схемах стадийного нестехиометрического сжигания топлив с целью предельного подавления выбросов оксидов азота. Но главное, эту новую величину ρ_m можно использовать для оценки изменения местной крутки ω_f в вихре, определяемой по формуле 6 для его отдельных зон, а также показать характер послойного изменения крутки во всем объеме вихря. Например, такое представление послойной, местной или текущей крутки было получено нами в процессе анализе формирования факела новой горелкой с широким диапазоном регулирования крутки. В качестве иллюстрации можно рассмотреть изменение местной крутки потока при его выходе из этой горелки (без горения топлива), которое представлено ниже.



Фиг.1. Распределение интенсивности текущей крутки ω_f в вихре

Совершенно очевидно, что крутка ω_f на периферии потока в несколько раз ниже его средней или интегральной крутки Θ , определенной на основе выражения 1. Крутка Θ всего потока (вихря) в том же сечении при выходе из модели горелки изменялась примерно в 10 раз ($\Theta \approx 0,23-2,1$), а при определении местной или послойной крутки ω_f нами здесь были использованы модифицированные формулы 2 и 4. То есть расчет ω_f был произведен нами по модели объемного вихря, как это сегодня принято чаще всего.

При этом оказалось, что местная крутка ω_f может быть как на порядок выше, так и в разы ниже значений крутки Θ интегрального вихря. В некоторых зонах интегрального вихря (Фиг.1), приближенных к оси вращения, местная крутка многократно превышала значение Θ , а на периферии потока всегда была существенно ниже. На то же указывают и установленные нами изменения угловых скоростей или частот вращения слоев потока на разных радиусах относительно оси вращения вихря. Частоты вращения внешних слоев на периферии вихря обычно в экспериментах не превышали 400-500 1/с. Однако в зонах местного усиления крутки ω_f , приближенных к оси вращения потока, частоты вращения слоев газа иногда увеличивались в 20-30 раз по сравнению с периферией. Это показывает, что традиционный и привычный анализ устройств по интегральной крутке всего вихря часто недостаточен, а возможно, и некорректен при анализе технических устройств и особенностей турбулентного переноса. Поэтому интегральную крутку Θ , как единственный параметр технического устройства опасно закладывать в расчеты и сопоставлять их между собой. Эти ошибки могут многократно усиливаться, если на практике использовать весьма условные формулы различных официальных методик расчета, сильно искажающих достоинства и недостатки реальных вихревых устройств.