

# Численное исследование аэродинамики закрученных потоков в трубах и газоходах

И.Л. Ионкин, Л.Л. Новожилова, П.В. Росляков  
Московский энергетический институт (технический университет)

На сегодняшний день решение многих технических задач невозможно представить без использования программных комплексов, позволяющих смоделировать тот или иной процесс трудноосуществимый на практике. В данном докладе представлен пример численного исследования аэродинамики закрученных потоков в дымовых трубах и газоходах ТЭС при помощи ПК Flow Vision. Необходимость рассмотрения данной задачи вызвана постоянно возрастающими требованиями, предъявляемыми к экологической эффективности промышленных предприятий. Одно из них предусматривает установку систем непрерывного мониторинга вредных выбросов в атмосферу на каждом предприятии, имеющем источники загрязнения [1]. Измерение уровня вредных выбросов ТЭС может производиться в сечениях расположенных в конвективной шахте котельной установки, газоотводящем коробе и в дымовой трубе [2] (рис. 1).

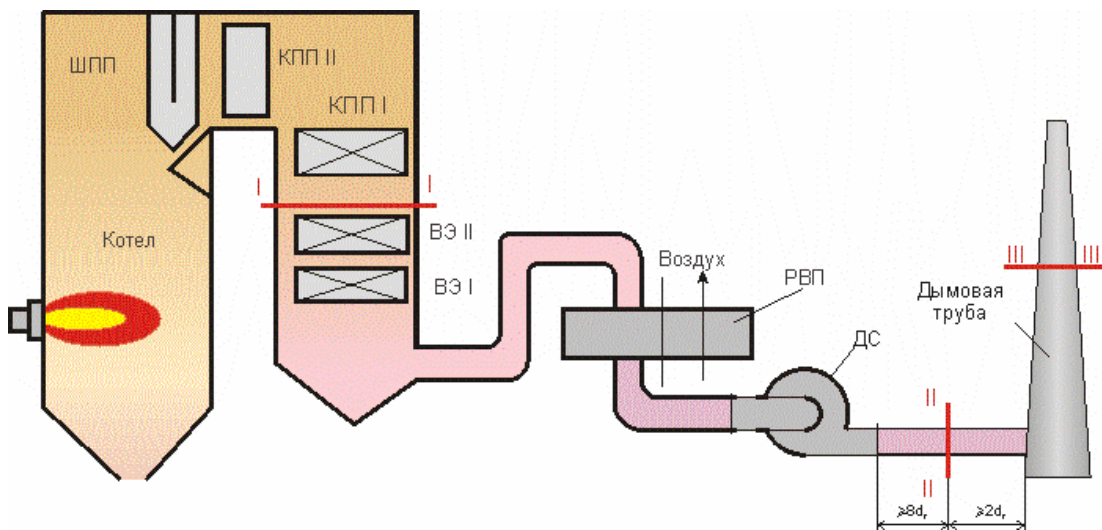


Рис. 1. Схема установки систем измерения вредных выбросов по газовому тракту

Одним из основных факторов, влияющим на точность измерения является представительность пробы в контрольном сечении. Величина массовых выбросов для  $i$ -го компонента  $M_i$  определяется как:

$$M_i = C_i^{cp} W_{cp} f, \quad (1)$$

где  $C_i^{cp}$  – средняя по сечению концентрация  $i$ -го компонента в дымовых газах;

$W_{cp}$  – средняя скорость дымовых газов в сечении;

$f$  – площадь контрольного сечения, в котором производятся измерения.

Таким образом, чтобы контроль выбросов был достоверным, сечение, в котором производятся инструментальные измерения, должно иметь достаточно равномерные поля скоростей и концентраций.

Целью численных экспериментов, выполненных с помощью ПК Flow Vision, являлось изучение влияния режимных и конструктивных факторов на распределение скоростей и концентраций газового потока в различных сечениях дымовой трубы и определение оптимальных мест установки измерительных систем для контроля массовых выбросов. Используя нормативные критерии оценки [3], в соответствии с которыми степень неравномерности полей скоростей и концентраций в контрольном сечении не должна превышать 10%, проводился анализ результатов расчета с точки зрения качества перемешивания потоков и степени выравнивания профиля скоростей.

В расчетах была использована модель *Incompressible Fluid (Несжимаемая жидкость)*, которая предназначена для моделирования течения газа (жидкости) при больших (турбулентных) числах Рейнольдса и при малых изменениях плотности.

Модель турбулентного теплопереноса в жидкости включает:

- уравнения Навье-Стокса (закон сохранения импульса);

- уравнение неразрывности (закон сохранения массы жидкости);
- закон сохранения энергии;
- уравнение диффузионного переноса скалярной величины (закон сохранения массы);
- $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности.

Модель турбулентной несжимаемой жидкости основана на стандартной  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности, в которой турбулентная вязкость  $\mu_t$  выражается через величины  $k$ - $\varepsilon$  следующим образом

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} f_\mu \quad (2)$$

где  $k$  – турбулентная энергия;  $\varepsilon$  – скорость диссипации турбулентной энергии;  $\mu_t$  – турбулентная вязкость;  $\rho$  – плотность.

В модели присутствуют следующие основные уравнения:

- **уравнения Навье-Стокса**

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla \left( (\mu + \mu_t)(\nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T) \right) + S \quad (3)$$

$$\nabla \mathbf{V} = 0 \quad (4)$$

где источник  $S = \left( 1 - \frac{\rho_{hyd}}{\rho} \right) \mathbf{g} + \mathbf{B} + \frac{\mathbf{R}}{\rho}$ , а  $\mathbf{B}$  – силы вращения,  $\mathbf{R}$  – силы сопротивления.

- **уравнение энтальпии**

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}h) = \frac{1}{\rho} \nabla \left( \left( \frac{\lambda}{C_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + \frac{Q}{\rho} \quad (5)$$

- **уравнения для  $k$  и  $\varepsilon$**

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}k) = \frac{1}{\rho} \nabla \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \frac{G}{\rho} - (\varepsilon - \varepsilon_{ini}) - F \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}\varepsilon) = \frac{1}{\rho} \nabla \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} \left( C_1 \frac{G}{\rho} - C_2 f_1(\varepsilon - \varepsilon_{ini}) \right) \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{ini}$  – начальное значение турбулентной диссипации,

$$а G = \mu_{eff} \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right)$$

- **уравнение массопереноса**

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}C) = \frac{1}{\rho} \nabla \left( \left( \rho D + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla C \right). \quad (7)$$

В рамках данного доклада рассматривается типовая дымовая труба с конической формой газоотводящего ствола и 2-х сторонним подводом газоходов прямоугольного сечения. В цокольной части трубы расположены наклонные пандусы и разделительная перегородка под углом  $45^\circ$  к оси подводящих коробов, чтобы исключить прямое соударение газовых потоков и снизить гидродинамическое сопротивление отводящего ствола. Конструктивные параметры расчетной области, представленные в таблице 1, были отражены в компьютерной модели, построенной при помощи программного комплекса SolidWorks.

Таблица 1

Параметр	Значение, м
Высота канала трубы $H_{тр}$	230
Диаметр устья $D_{ус} = D_{экв}$	8,3
Наибольший проходной диаметр основания $D_{осн}$	14
Высота разделительной перегородки $H_{пер}$	12,7

Численный эксперимент проводился для вариантов с максимальными и пониженными расходами при симметричном и несимметричном подводе газов в дымовую трубу, для случаев с гладким стволом, с заданной шероховатостью и консольными выступами для крепления футеровки (см. таблицу 2).

Таблица 2

Вариант	Характеристика стенки	Отношение скорости газов в каналах к скоростям на номинальной нагрузке, %	
		Канал 1	Канал 2
1	шероховатость 5 мм	100	100
2	консольные выступы с шероховатостью 5 мм	100	100
3	гладкая	100	100
4		150	50
5		50	50
6		50	0

В расчетах были приняты некоторые допущения, которые заключались в том, что профиль скоростей потоков на входе в подводящие каналы равномерный и атмосферное давление остается постоянным по высоте дымовой трубы.

При обработке и представлении результатов использовались различные средства визуализации постпроцессора. В данном докладе представлены векторные поля скоростей в продольных и поперечных сечениях дымовой трубы при помощи соответствующего слоя. В качестве средства отображения абсолютных величин скоростей и концентраций, а также их процентных отклонений от среднего значения по сечению использовался слой «заливка».

Как показали результаты, для всех вариантов в нижней части трубы до высоты 6-8 эквивалентных диаметров наблюдается сложная картина течения газов. Практически во всех вариантах после перегородки наблюдались зоны обратных токов (рис. 2а). Разделительная перегородка, расположенная под углом  $45^\circ$  к горизонтальным осям подводящих коробов способствует закрутке газовых потоков. В результате движение газов носит подъемный и слабо вращательный характер с образованием двух зон циркуляции (рис. 2б) в горизонтальной плоскости, переходящих при дальнейшем подъеме в одну (рис. 2в).

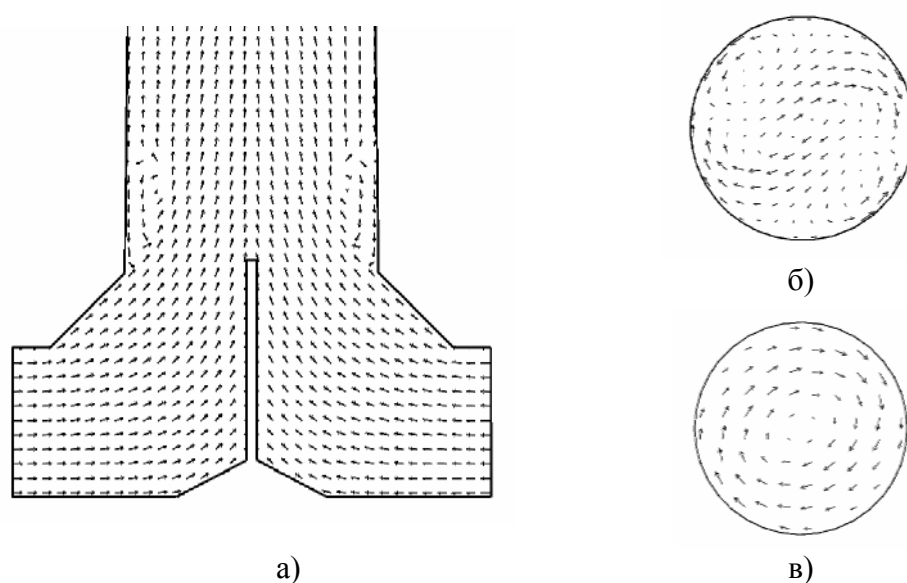


Рис. 2. Изображение полей векторов скоростей: а) в нижней части продольного разреза дымовой трубы; б), в) в поперечных сечениях на высоте  $D_{ЭКВ}$  и  $20 D_{ЭКВ}$  соответственно

Как следует из расчетов, учет шероховатости газоотводящего ствола не оказало существенного влияния на картину течения. Исключение составляют области расположенные

вблизи стенки, где наблюдается пониженные значения аксиальных скоростей газов по сравнению со средними значениями в данном сечении. На рисунке 3 показана картина распределения полей скоростей в виде процентных отклонений от среднего значения для вариантов 3 (рис. 3а), 1 (рис. 3б), 2(рис. 3в) в сечениях свыше 10 эквивалентных диаметров.

Снижение скоростей в районе стенки способствует снижению интенсивности выравнивания поля концентраций в пристеночной области. На рисунке 4 представлена иллюстрация распределения полей концентраций для вариантов: 3 (рис. 4а), 1 (рис. 4б), 2 (рис. 4в) в сечении расположенном на высоте 10,5 эквивалентных диаметров. В представленной шкале «0» и «1» соответствуют исходным концентрациям двух потоков, а промежуточные значения – различной степени их перемешивания.

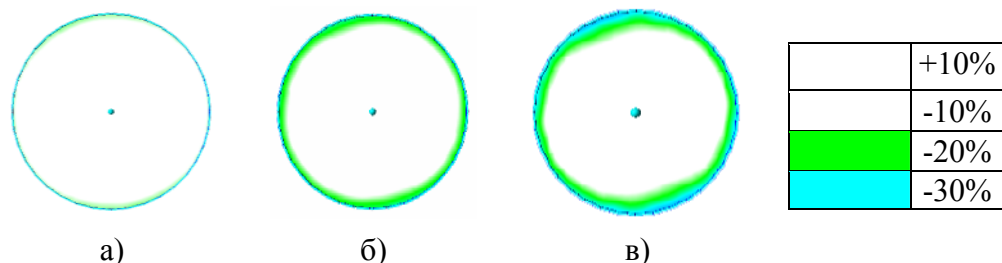


Рис. 3. Распределение полей скоростей в поперечных сечениях на высоте свыше 10D<sub>экв</sub> при симметричном подводе газов: а) вариант 3 (гладкий ствол); б) вариант 1 (шероховатость 5 мм), в) вариант 2 (консольные выступы)

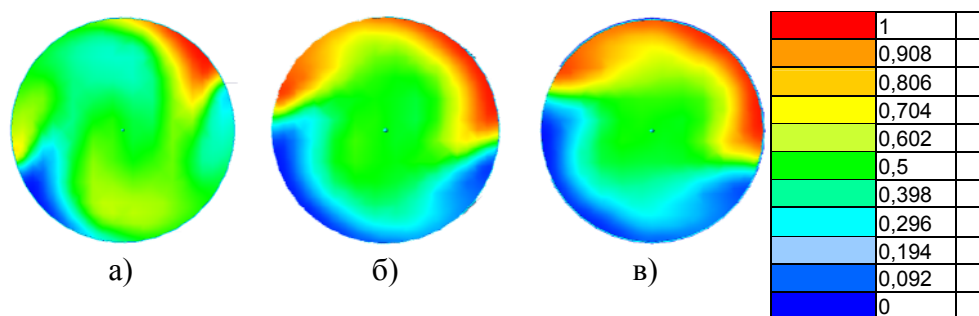


Рис. 4. Распределение полей концентраций в поперечных сечениях на высоте свыше 10D<sub>экв</sub> при симметричном подводе дымовых газов: а) вариант 3 (гладкий ствол); б) вариант 1 (шероховатость 5 мм), в) вариант 2 (консольные выступы) на расстоянии 10,5 эквивалентных диаметров

Дальнейшие эксперименты были построены на рассмотрении влияния расходов продуктов сгорания, подводимых к трубе, на профиль скоростей и распределение концентраций в гладкоствольной модели. Оценивая полученные результаты нельзя не отметить, что в отличие от уже рассмотренных случаев, картины течения, а также особенности распределения исследуемых величин, характерные для вариантов 3-6 существенно отличаются.

На рисунке 5 изображены поля аксиальных скоростей в нижней части продольных разрезов дымовой трубы для варианта 6, где организован односторонний подвод среды. Одной из особенностей данного случая является наличие ярко выраженной зоны обратных токов. Очевидно, что подача среды в уменьшенном количестве неблагоприятно сказывается на выравнивании полей скоростей и концентраций в поперечном сечении из-за неполного заполнения объема трубы продуктами сгорания.

Наилучшее выравнивание поля скоростей по высоте дымовой трубы наблюдается в вариантах 3 и 5, в которых моделировались равные расходы дымовых газов через подводящие каналы (рис. 6).

Также было замечено, что при двухстороннем подводе продуктов сгорания в дымовую трубу наиболее интенсивное перемешивание имеет место в районе взаимодействия вихрей. Значительно быстрее выравнивание полей концентраций происходит в варианте 4, где потоки имеют различные импульсы, а суммарный расход соответствует максимальной величине (рис. 7).

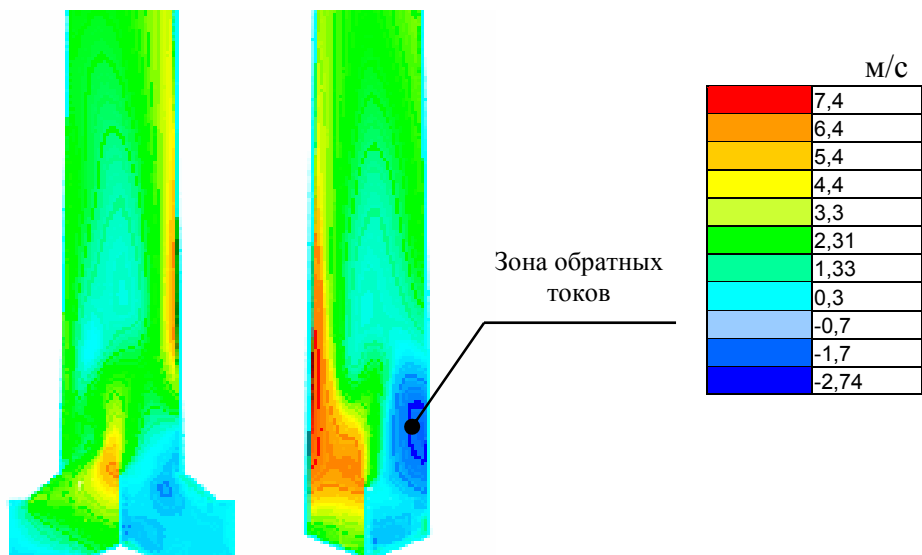


Рис. 5. Распределение полей скоростей в продольных сечениях для варианта 6.

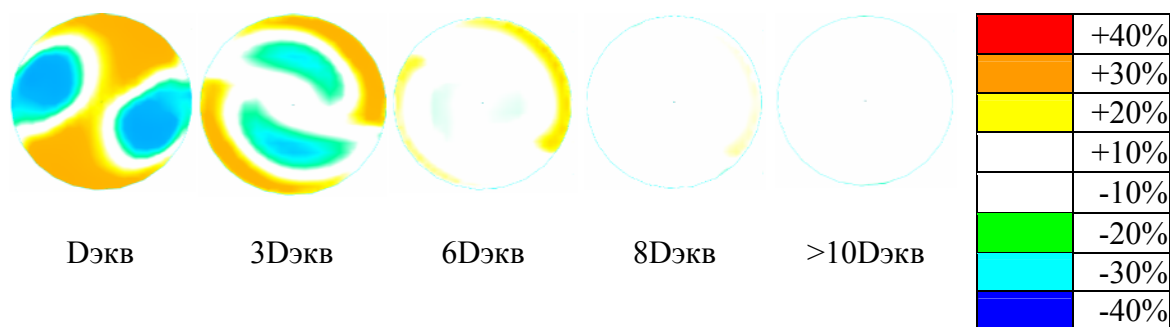


Рис. 6. Поля скоростей в поперечных сечениях для варианта 3.

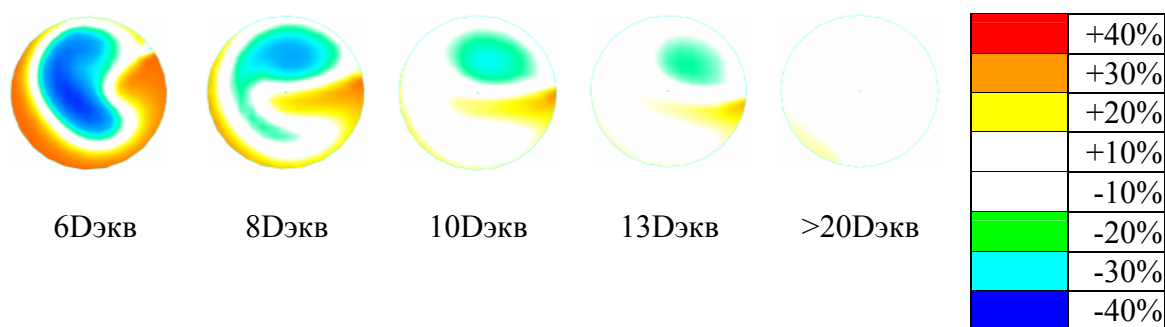


Рис. 7. Распределение полей концентраций в поперечных сечениях для варианта 4.

Таким образом, анализ и обобщение результатов численных экспериментов, полученных для различных конструктивных и режимных условий, позволит разработать практические рекомендации по установке измерительных устройств в газовом тракте.

### Литература

1. РД 34.02.306-98. Правила организации контроля выбросов в атмосферу на тепловых электростанциях и в котельных. М.: СПО ОРГРЭС, 1998.
2. Контроль вредных выбросов ТЭС в атмосферу/П.В. Росляков, И.Л. Ионкин, И.А. Закиров и др.; Под ред. П.В. Рослякова. – М.: Издательство МЭИ, 2004.
3. Технические требования к автоматизированной системе контроля выбросов загрязняющих веществ ТЭС. М.: РАО «ЕЭС России», 1997.