

ГИПОТЕЗА О СУЩЕСТВОВАНИИ ВТОРИЧНЫХ ВИХРЕЙ В ЦИКЛОНЕ

Незамаев Н.А., Веригин А.Н.

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет), Санкт-Петербург*

Ключевые слова: вихрь, циклон, методика, скорость, частица.

Аннотация. Изучены три методики по определению вторичных токов в нисходящем газовом потоке в возвратнопоточном циклоне. Предложена методика расчета скорости вращения вторичных вихревых токов, которую можно использовать для инженерных расчетов при проектировании циклонов. Полученные результаты в полной мере могут быть использованы только при исследовании циклонов типа ЦН.

HYPOTHESIS ON THE EXISTENCE OF SECONDARY VORTICES IN CYCLONE

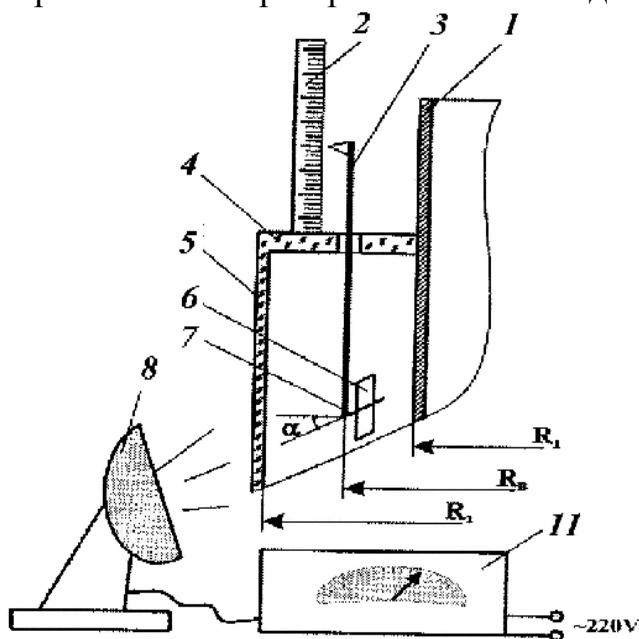
Nezamaev N.A., Verigin A.N.

Saint-Petersburg State Technological Institute (Technical University), Saint-Petersburg

Keywords: whirlwind, cyclone, technique, speed, particle.

Abstract. Three techniques were studied to determine the secondary currents in a downward gas stream in the return cyclone. A method for calculating the speed of rotation of secondary vortex currents is proposed, which can be used for engineering calculations when designing cyclones. The results obtained are fully used only in the study of the cyclones of the type of TN.

Для подтверждения существования вторичных вихрей в нисходящем газовом потоке в возвратно поточном циклоне типа ЦН было проведено несколько серий экспериментов по трем различным методикам [1] (см. рис. 1).



1 – стенка выхлопной трубы; 2 – измерительная линейка; 3 – стержень вертушки; 4 – крышка циклона (органическое стекло); 5 – стенка корпуса (органическое стекло); 6 – вертушка; 7 – ось вертушки; 8 – осветитель; 9 – трубка Пито; 10 – микроманометр; 11 – стробоскоп СТ-5

Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Первая методика – изучение спирального следа из частиц на внутренней стенке корпуса циклона. По примеру Прандтля [2, 5] наличие вторичных токов в нисходящей газовой спирали было подтверждено следующим образом. На внутреннюю поверхность корпуса циклона был нанесен слой суспензии (окись титана на воде). После высыхания воды на стенках образовывался налет пыли.

Далее в циклон подавался газовый поток и в течение двух часов аппарат работал при заданном режиме $\omega = const$. Затем циклон разбирался, и на его внутренней поверхности наблюдалась следующая картина (рис. 1). Спиральный след, полученный на стенке корпуса, дает возможность определить границу между двумя парными вихрями. Получение спиралеобразного следа из частиц TiO_2 с высотой больше первоначального покрытия свидетельствует о том, что газовый поток сверху и снизу от получаемого следа сдувает со стенок частицы TiO_2 и затем собирает их в зоне между двумя соседними вихрями.

Вторая методика – определение центров вторичных вихрей и частоты их вращения. Для нахождения центров вращения вторичных вихрей и направления их вращения был проведен следующий эксперимент. В рабочую зону циклона между выхлопной трубой и корпусом помещался вертикальный стержень, на нижнем конце которого была укреплен ось с установленной на нее вертушкой (рис. 1). Ось вертушки имела угол с горизонтом α , который был найден из предыдущих экспериментов (см. рис. 1). Поверхность лопастей вертушки была расположена параллельно направлению движения основного потока. Так, вертушка приводилась во вращение только за счет вторичных вихревых токов. Вертикальный стержень размещался параллельно образующим корпуса и выхлопной трубы на расстоянии

$$R_g = (R_2 + R_1) / 2. \quad (1)$$

В ходе опытов стержень помещался в различные точки окружности с радиусом R_g и перемещался по высоте. Визуально фиксировались моменты, когда вертушка не вращалась – это были точки между соседними вихрями, и когда наблюдалось вращение в ту или другую сторону (центры вихрей). По линейке 2 производился отсчет результатов (точки на окружности были заранее определены). Полученные при этом результаты совпадают с полученными по методу Прандтля.

Кроме определения геометрических размеров расположения вторичных вихрей в циклоне с помощью вертушки были проведены эксперименты по приближенной оценке угловой скорости вращения вертушки (т.е. вихря) с помощью строботачометра СТ-5 (см. рис. 1) по методике, приведенной в [3]. В результате для выбранного нами циклона были получены значения ω порядка 3000-5000 об/мин или $50-83 \text{ с}^{-1}$, которые могут быть занижены, поскольку:

- вертушка представляла собой простейшее приспособление из бронзовой проволоки (ось) диаметром 0,2 мм, а сама крыльчатка склеена из бумаги (5x2мм), и гидродинамические характеристики ее были не высоки;

- учитывая большую скорость вращения, можно с уверенностью сказать, что энергия, затрачиваемая на трение, велика;

– стержень вводился сверху, диаметр его был соизмерим с размерами канала, и вносимые им возмущения также оказывали влияние на частоту вращения крыльчатки.

Однако, несмотря на возможные погрешности в измерении ω , наглядность метода убедительно доказала существование вторичных вихревых токов в нисходящем потоке газа.

Третья методика – определение скорости вращения вихрей. При проектировании все-таки требуется уметь рассчитать скорость вращения вторичных вихревых токов ω , была использована еще одна методика, которая основывалась на применении модифицированной трубки Пито. В настоящей работе данная методика была уточнена (рис. 1). В место трубки Пито был использован пьезометрический датчик, который позволял практически непрерывно замерять изменение давления по высоте рабочей зоны циклона. При его постепенном опускании вниз определялись точки (по высоте), где наблюдались максимальные перепады ΔP_1 . Затем пьезометрический датчик разворачивалась на 180° и постепенно поднималась вверх. При этом проводились измерения ΔP_2 в найденных ранее точках.

Замеры проведены при скорости нисходящего потока 4,87 м/с через отверстие в крышке циклона, отстоящее от входа на 270° по ходу потока. Далее результаты обрабатывались по следующей методике (аналогичный приведенной в [4]).

Давление ΔP_1 , измеренное микроманометром, равно

$$\Delta P_1 = P_1 - P_a + \frac{\rho v_1^2}{2}. \quad (2)$$

Давление ΔP_2 , измеренное в этой же точке при повороте трубки на 180° , будет

$$\Delta P_2 = P_2 - P_a - \frac{\rho v_2^2}{2}. \quad (3)$$

Так как $v_2 = v_1$, $P_1 = P_2$, то из (2) и (3) получим

$$\Delta P_1 - \Delta P_2 = \frac{\rho v_1^2}{2} - \left(-\frac{\rho v_2^2}{2} \right). \quad (4)$$

Отсюда скорость

$$v_1 = \left(\left| \frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{\rho} \right| \right)^{1/2}. \quad (5)$$

$$\omega = \frac{4(R_2 - R_1)v_H}{(R_2 - R_1)^2 \cdot \left(\ln \frac{8(R_2 + R_1)}{R_2 - R_1} - \frac{1}{4} \right)}. \quad (6)$$

Учитывая, что для нормализованных циклонов типа НЦ справедливо соотношение $R_1 = 0,6R_2$, (6) сводится к следующему выражению:

$$\omega \approx 12,44v_H / R_2. \quad (7)$$

Различие с экспериментом достигает 30%. Сходимость можно обеспечить корректировкой уравнения (6), в котором член

$$\left(\ln \frac{8(R_2 + R_1)}{R_2 - R_1} - \frac{1}{4} \right)$$

необходимо заменить на

$$\left[\ln \left(8 \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} \right)^{4/3} - \frac{1}{4} \right],$$

и тогда (7) примет вид

$$\omega \approx 9,2v_H / R_2. \quad (8)$$

Сравнение рассчитанных по эмпирической зависимости (8) и экспериментальных данных показывает, что расхождение в пределах $\pm 10\%$. Зависимость (8) можно использовать для инженерных расчетов при проектировании циклонов. Полученные результаты в полной мере могут быть использованы только при исследовании циклонов типа ЦН. При применении циклонов другого типа необходимы дальнейшие исследования.

Список литературы

1. Веригин А.Н. Химико-технологические агрегаты конденсационного улавливания пыли / А.Н. Веригин, С.А. Малютин, В.Н. Федоров. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2000. – 325 с.
2. Ингель Л. Х. Обобщение модели Прандтля на случай склоновых течений с тяжелой примесью // Прикладная механика и техническая физика. – 2018. – №5. – С. 104-108.
3. Лассан В.Л. Измерение угловых скоростей. – М.: Химия, 1970. – 320 с.
4. Жидков В.В. Закономерности движения частиц порошка в зоне сепарации цилиндрической формы классификатора центробежного типа / В.В.Жидков, В.С. Богданов, И.А. Семикопенко, И. Н. Логачев, В.Г. Дмитриенко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2012. – №1. – С. 60-65.
5. Повх И.Л. Техническая гидромеханика – Л.: Машиностроение, 1969. – 524с.

Сведения об авторах:

Незамаев Николай Александрович – к.т.н., доцент;

Веригин Александр Николаевич – д.т.н., профессор.