

Асламов Александр Анатольевич,
к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,
e-mail: aaa_mx@angtu.ru

Аршинский Максим Иннокентьевич,
к.т.н., инженер, АО «Ангарская нефтехимическая компания»,
e-mail: arshmax@mail.ru

Рудых Евгений Александрович,
студент, Иркутский национальный исследовательский технический университет,
e-mail: Rudykh_Evgeny@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЕПАРАЦИИ В ПРЯМОТОЧНОМ ЦИКЛОНЕ

Aslamov A.A., Arshinskiy M.I., Rudykh E.A.

MODELING THE SEPARATION PROCESS IN THE DIRECT-FLOW CYCLONE

Аннотация. Путём численного моделирования в ANSYS Fluent CFX процесса сепарации в прямооточном циклоне ПЦПС получены поля распределения скоростей газа и распределения пылевых частиц.

Ключевые слова: прямооточный циклон ПЦПС, ANSYS Fluent CFX, распределение скоростей газа, распределение пылевых частиц.

Abstract. By numerical simulation in ANSYS Fluent CFX of the separation process in a direct-flow cyclone of a PCR, we obtained the fields of gas velocity distribution and dust particle distribution.

Keywords: direct-flow cyclone PCR, ANSYS Fluent CFX, gas velocity distribution, dust particle distribution.

На сегодняшний день в мире, наряду с увеличением темпов роста производства и потребления, остро стоят вопросы экологии, в частности, защиты атмосферного воздуха от загрязнений. Эффективность новых разрабатываемых газоочистных установок (ГОУ) во многом зависит от правильно подобранного оборудования и точности инженерных расчетов, что в значительной степени определяется аэродинамикой течения рабочей среды в различных элементах проектируемых аппаратов [1]. Одним из эффективных элементов ГОУ является центробежная сепарация в прямооточном циклоне с камерой переменного сечения (ПЦПС) [2, 3]. Разработка ПЦПС требует особого подхода при расчете движения пыле-газовоздушной смеси, что во многом определяет его эффективность.

Процессы пыле-газоочистки в прямооточных циклонах достаточно широко изучены, и существует большое количество публикаций по данной тематике [4, 5, 6]. Исследователями были экспериментально изучены поля скоростей, давлений, зависимости эффективности пыле-газоочистки от геометрических параметров в сепарационной камере ПЦПС и получены регрессионные зависимости [7, 8, 9]. Однако, несмотря на определенные успехи исследователей,

теоретические аспекты разделения частиц в центробежных полях изучены недостаточно полно, данные физических экспериментов дают малоинформативное представление о протекающих процессах, а представления о движении частиц и попытки создания математических моделей в центробежном поле требуют уточнения. Таким образом для выполнения более достоверных расчетов движения двухфазных пыле-газовоздушных потоков в камере переменного сечения ПЦПС, было произведено численное моделирование процесса пылегазоочистки методом конечных элементов (МКЭ).

Моделирование и расчет движения двухфазной пылевоздушной смеси в прямоточном циклоне с камерой переменного сечения проводили с использованием CFD пакета ANSYS Fluent CFX [10]. При моделировании движения твердых частиц в потоке газа Ansys CFX, как и в большинстве других аналогичных программных продуктов, используется два базовых метода – Лагранжа и Эйлера [11]. Метод Лагранжа может достоверно описать движение одиночных частиц при условии их упругого соударения со стенкой расчетной области, что справедливо только для порошкового материала крупнодисперсной фракции (свыше 100 мкм). Достоинством метода Эйлера является то, что разницу концентраций дисперсной фазы между 2-мя точками определяет диффузионный поток. Метод применяется для тонкодисперсной (до 10 мкм) и мелкодисперсной фракции пыле-газовоздушной смеси (до 100 мкм).

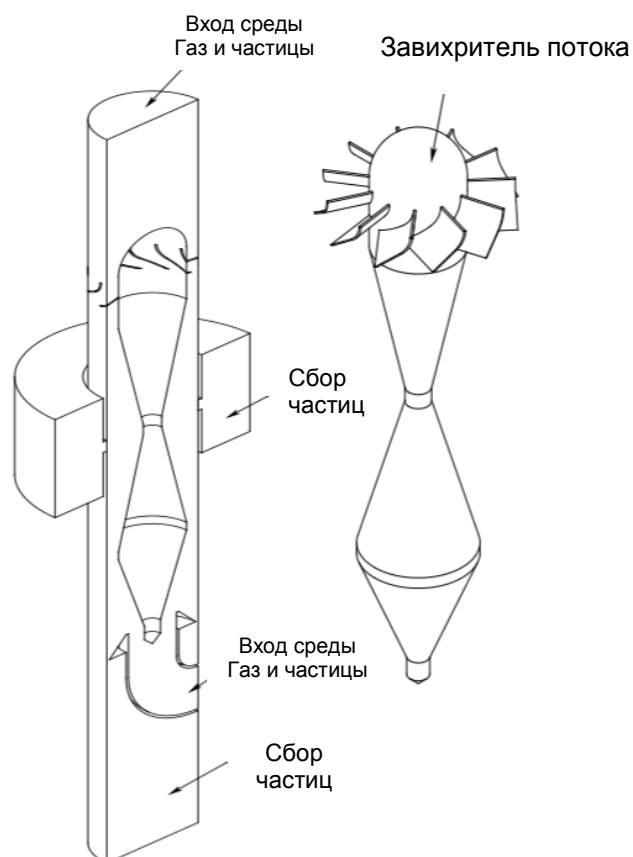


Рисунок 1 – Общий вид завихрителя и расчетной геометрии в разрезе

В первую очередь был определен перечень решаемых задач:

1. Создание в САПР расчетной геометрии, которая является основой для сеточной математической модели.
2. Проведение расчетного исследования процесса движения пылевоздушной смеси с выбором математических моделей.
3. Получение результатов расчетов в цифровом формате.
4. Сокращение натуральных экспериментальных исследований при проектировании завихрителей, которые применяются в циклоне.

При разработке технического решения, направленного на обеспечение пропорционального распределения пылевоздушной смеси на выходе из ПЦПС, была построена трехмерная модель проектируемой установки. Геометрия разрабатывалась в графической CAD системе КОМПАС 3D, которая позволяет экспортировалась геометрию в ANSYS CFX в формате Parasolid (*.x_t). Общий вид расчетной геометрии ПЦПС приведен на рисунке 1.

Первый этап моделирования процесса движения пылевоздушной смеси сводится к выбору основных математических моделей, которые будут применяться в расчете:

- модель переноса энергии;
- модель движения газообразной среды;
- модель распределения частиц дисперсной фазы в турбулентном потоке.

Модель переноса энергии (totalenergy) учитывает и теплообмен, и сжимаемость, используется для жидкой или газообразной среды, при интегрировании уравнения энергии учитывается заданное исходное состояние вещества в расчетной области.

Общий вид уравнения энергии для жидкого или газообразного вещества имеет вид:

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla(\rho U h_{tot}) = \nabla(\lambda \nabla T) + \nabla(U \tau) + US_M + S_E, \quad (1)$$

где ρ – плотность вещества; λ – молекулярная теплопроводность; U – скорость; P – статическое (термодинамическое) давление; h_{tot} – полная энтальпия; τ – касательное напряжение; S_E – объемный источник энергии; S_M – величина начального импульса; T – относительная температура.

В качестве модели турбулентности использовалась RNG-разновидность модели $k-\varepsilon$. Данную модель предложили Якхот и Орзаг в 1986 году, воспользовавшись теорией ренормгрупп (renormalizationgroup, RNG) и создали RNG-версию модели турбулентности. Эта версия несколько отличается от стандартной модели $k-\varepsilon$ коэффициентами. Из всего арсенала моделей турбулентности CFX данная модель позволяет более точно описывать сложные пространственные течения и оптимально подходит для моделирования потока твердых частиц в рассматриваемой расчетной геометрии.

Модель распределения частиц дисперсной фазы в турбулентном потоке предполагает, что частица всегда движется только в одном вихре. Каждый вихрь имеет нестабильную составляющую скорости V_f , период существования t_e и длину L_e . Когда частица попадает в вихрь, нестабильная составляющая скорости для этого вихря добавляется к стабильной составляющей скорости сплошной фазы. В результате получается мгновенное значение скорости сплошной фазы. Турбулентная скорость, длина и период существования каждого вихря считаются на основании заданных граничных условий турбулентного потока и определяются следующими уравнениями:

$$V_f = \Gamma \sqrt{\frac{2k}{3}}, \quad L_e = \frac{c_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\varepsilon}, \quad t_e = \frac{L_e}{\sqrt{\frac{2k}{3}}}, \quad (2)$$

где k – скалярный коэффициент энергии турбулентного потока; ε – скалярный коэффициент рассеивания потока; c_μ – постоянная турбулентности; Γ – случайная величина, которая выбирается для того, чтобы определить случайность турбулентного потока.

Исходные данные для расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования

Наименование параметра	Величина
Плотность частиц, кг/м ³	1950
Плотность газовой смеси, кг/м ³	1,29
Динамическая вязкость газовой смеси, Па·с	0,000153
Массовый расход пыли, кг/с	0,0017
Расход газовой смеси, м ³ /ч	293,713
Начальная температура системы, К	293
Размер частиц, мкм	83, 20, 3,5

Входная задаваемая степень турбулентности потока равна 0,05, а масштаб турбулентности, который определяется геометрией исследуемой области, приравнивается к диаметру входного канала. Смесь подается равномерно. Весь спектр частиц разбивался на N-е число групп. При этом вводилось допущение, что поведение каждой отдельной группы частиц может быть описано поведением одной частицы – маркера. Таким образом, в данной работе отслеживались траектории движения порядка 5000 частиц – маркеров.

Расчетная область является частью рассматриваемой конструкции ПЦПС. На основе предварительного анализа сходимости в ней была построена сеточная математическая модель (рисунок 2), состоящая из 1352827 тетраэдральных элементов. Размер элементов в пристеночных слоях задавался с уче-

том критерия y^+ , который должен удовлетворять условию $30 < y^+ < 300$, так как газовая смесь движется в сильно развитом турбулентном потоке.

В задачах со сжимаемыми течениями рекомендуется на первом этапе провести решение с более устойчивой физической моделью, а затем использовать это решение как начальное условие (инициализацию) для решения физически более сложной задачи. Настройки решателя приведены в таблице 2.

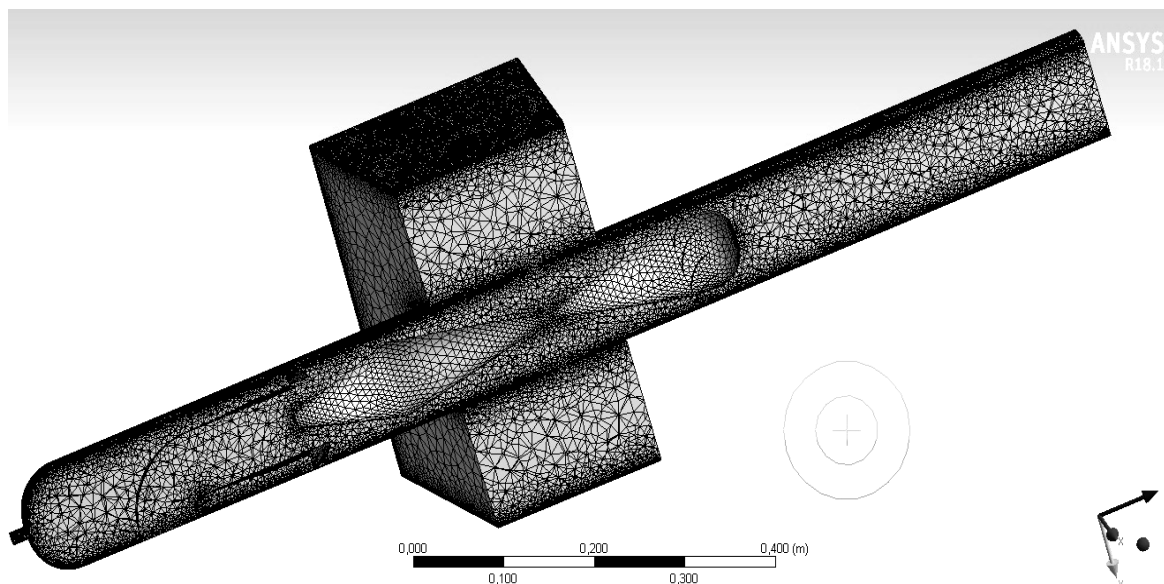


Рисунок 2 - Сеточная математическая модель

Таблица 2

Настройки параметров решателя ANSYS CFX

Наименование параметра	Название
Тип анализа (переходный)	Transient
Расчетный шаг	Timesteps = 0.00037542 [s]
Расчетное время	Total Time = 0,3 [s]
Расчетная схема (TRANSIENT SCHEME)	Second Order Backward Euler
Порядок турбулентности	FirstOrder
Максимальное число итерации	20
Минимальное число итерации	1
Расчетная траектория движения частиц	Maximum Tracking Distance = 50 [m]

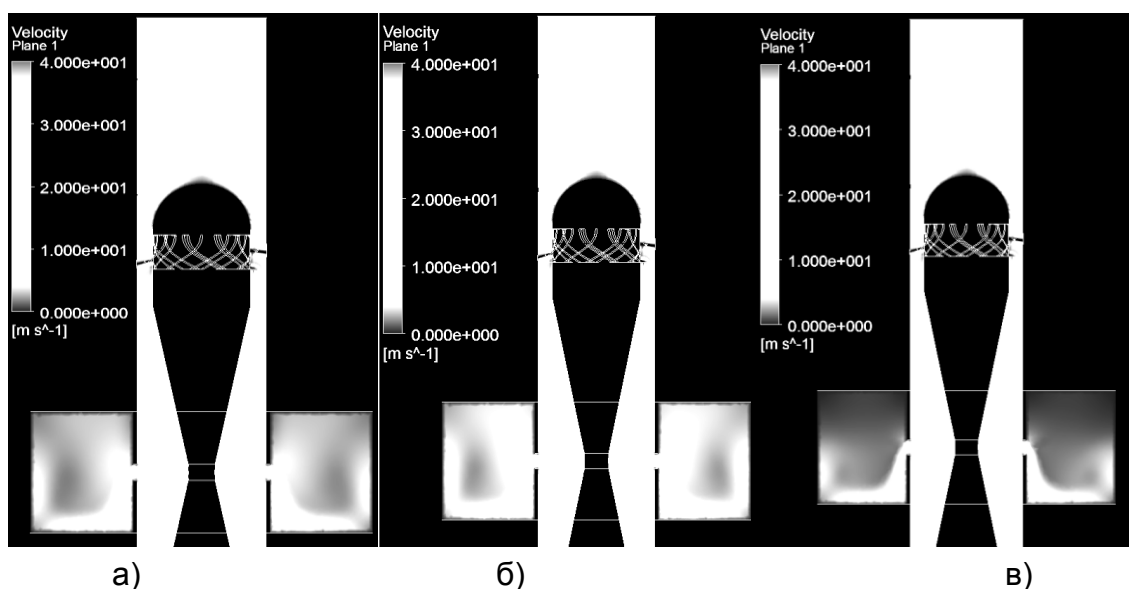
Как видно из результатов моделирования, частицы после завихрителя движутся преимущественно вдоль стенки расчетной модели, а затем попадают в область сбора частиц (рисунок 3). На приведенных цветовых картах можно наглядно оценить интенсивность распределения частиц с учетом изменения времени переходного процесса.

На цветowych картах рисунка 4 можно наглядно оценить интенсивность распределения скоростей с учетом изменения времени переходного процесса.

Наибольшая скорость газовой среды наблюдается после завихрителя, профили скоростей имеют экстремум на радиусе $r_m = 17-22$ мм. С физической точки зрения это объясняется изменением характера вращательного движения из квазипотенциального течения в периферийной области на квазитвёрдое течение в центральной области. Для описания скорости закрученного потока ω в технологических аппаратах используют так называемый вихрь Рэнкина [12]:

$$\omega \cdot r^n = const \quad (3)$$

где r_m – радиус раздела квазитвёрдого и квазипотенциального вращения газа; показатель n , который равен $n = -1$ для квазитвёрдого вращения газа ($0 < r < r_m$), и $|n| \leq 1$ – для квазипотенциального движения газа ($r_m \leq r$).



а – расчетное время процесса 0,1 сек.; б – расчетное время процесса 0,2 сек.; в – расчетное время процесса 0,3 сек.

Рисунок 4 - Цветовые карты распределения скоростей газовой среды

Таким образом, профилированное тело служит вытеснителем квазитвёрдого движения, и, как следствие, наблюдается сохранение компоненты тангенциальной скорости. Конструкция вытеснителя предназначена для увеличения эффективности сепарации за счет предотвращения уноса уловленных частиц пыли при уменьшении скорости потока в зоне, прилегающей к промежуточному отбору (ПО).

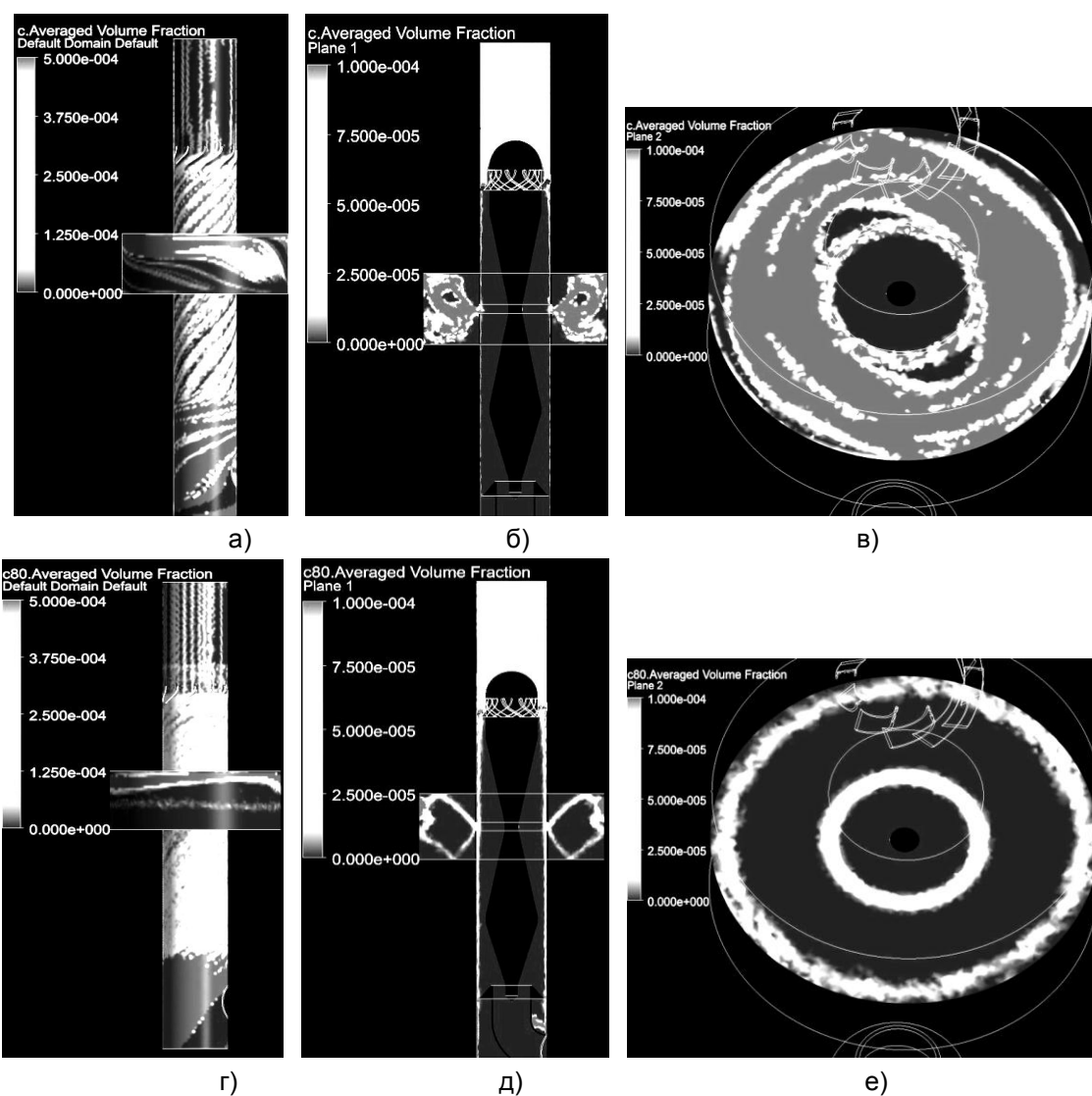
Данные по распределению полей скоростей и давлений в сепарационной камере переменного сечения ПЦПС, полученные с помощью моделирования, подтверждают экспериментальные данные в работах [7, 8].

Расчетная схема моделирования второго этапа аналогична схеме пер-

вого этапа за исключение следующих обстоятельств:

- расчет проводится для установившегося режима;
- перенос массы в ANSYS CFX определялся в соответствии с моделью переноса частиц (Particle Model) и моделью Dispersed Fluid. Dispersed Fluid Model применяется для частиц жидкой фазы, когда используется подход только с применением эйлеровой модели.

Как видно из результатов моделирования (рисунок 5) распределения концентраций частиц, траектория движения частиц после завихрителя в пристеночных областях представлена в форме вихревых жгутов. Форма вихревых жгутов зависит от размера частиц и массового расхода. Наиболее интенсивное завихрение наблюдается для частиц с размерами 30 микрометров, поэтому наилучшее улавливание данных частиц наблюдается в самой верхней области отбора частиц.



а, б, в – твердые частицы с размером 30 мкм.; г, д, е – с размером 80 мкм.

Рисунок 5 - Цветовые карты распределения скоростей газовой среды

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976. 888 с.
2. Аршинский М.И., Асламов А.А., Асламова В.С. Прогноз эффективности очистки группового циклона ПЦПО по усовершенствованному методу // Журнал «Транспортная инфраструктура сибирского региона», 2013, том 1, с.177-182.
3. Асламова В.С. Прямоточные циклоны. Теория, расчет, практика Ангарск, АГТА, 2008, 233 с.
4. Шияев, М.И. Моделирование процесса пылеулавливания в прямоточном циклоне. 1. Аэродинамика и коэффициент диффузии частиц в циклонной камере / М.И. Шияев, А.М. Шияев // Теплофизика и аэромеханика, 2003, Т. 10, № 2. С. 157-170.
5. Барахтенко, Г.М. Характеристики прямоточных циклонов с многовходным улиточным закручивателем / Г.М. Барахтенко, И.Е. Идельчик // Промышленная и санитарная очистка газов, 1978, № 2, С. 12-13.
6. Асламова, В.С. Влияние геометрических и режимных параметров прямоточного циклона на его эффективность / В.С. Асламова, А.Н. Шерстюк // Теплоэнергетика, 1991, № 10, С. 63-67.
7. Асламов, А.А. Аппроксимация полей скоростей и давлений в прямоточном циклоне с сепарационной камерой переменного сечения / А.А. Асламов, М.И. Аршинский, И.М. Кулакова, В.С. Асламова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013, № 2 (38). – С. 163-168.
8. Асламов, А.А. Регрессионные модели полной скорости и статического давления в прямоточном циклоне переменного сечения / А.А. Асламов, М.И. Аршинский, В.С. Асламова, И.М. Кулакова // Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXVI Междунар. науч. конф.: в 10 т. Т 2./ Под общ. ред. А.А. Большакова. – Нижний Новгород : Нижегород. гос. техн. ун-т, 2013. – С. 147-149.
9. Аршинский М.И. Экспериментальное определение полей скоростей и давлений закрученного потока в кольцевом канале прямоточного циклона с промежуточным отбором // Материалы международной научно-практической конференции «Внедрение результатов инновационных разработок: проблемы и перспективы». 2016, С. 41-47.
10. ANSYS Fluent CFX Tutorial Guide. ANSYS Inc.: Southpointe, 2011. 1146 р.
11. Миньков Л.Л. Методические указания к решению задачи о ламинарном течении вязкой несжимаемой жидкости в трубе с помощью вычислительного пакета ANSYS Fluent CFX. Томск: STT, 2016. 68 с.
12. Гуцол, А.Ф. Эффект Ранка / А.Ф. Гуцол // Успехи физических наук, 1997, Т. 167, № 6. С. 665-687.