

УДК 628.512.621.928

**Зиганшин М.Г.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [mjihanshin@mail.ru](mailto:mjihanshin@mail.ru)

**Зиганшин А.М.** – кандидат технических наук, доцент

**Гильфанов Р.М.** – кандидат технических наук, доцент

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

## **РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОСАЖДЕНИЯ ВЗВЕСИ В АППАРАТАХ С ВРАЩАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ МУЛЬТИФАЗНЫХ ПОТОКОВ. ЧАСТЬ 2. КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛОННОЙ СЕПАРАЦИИ**

### **АННОТАЦИЯ**

Методами теории подобия – анализа размерностей и приведения к безразмерному виду дифференциальных уравнений, описывающих сепарацию частиц из криволинейных потоков, получены критериальные характеристики, позволяющие определять расчетным путем конструктивные размеры аппаратов по требуемой степени очистки потока.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** теория подобия, сепарация частиц, критериальные характеристики, эффективность очистки.

**Ziganshin M.G.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [mjihanshin@mail.ru](mailto:mjihanshin@mail.ru)

**Ziganshin A.M.** – candidate of technical sciences, associate professor

**Gilfanov R.M.** – candidate of technical sciences, associate professor

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

## **SETTLEMENT PARAMETERS OF THE SUSPENSION SEDIMENTATION IN DEVICES WITH THE ROTARY MOTION OF MULTIPHASE FLOWS. PART 2. CRITERIA OF CYCLONIC SEPARATION EFFICIENCY**

### **ABSTRACT**

Methods of the theory of similarity, the analysis of dimensions and reduction to a dimensionless kind of the differential equations describing separation of particles from curvilinear streams, are received the criteria characteristics, allowing to define a settlement way the constructive sizes of devices on demanded degree of a stream clearing.

**KEYWORDS:** the similarity theory, separation of particles, criteria characteristics, efficiency of clearing.

В прикладных исследованиях рассматривается, как правило, монодисперсная взвесь сферических элементов, не взаимодействующих друг с другом, и их результаты нуждаются в тарировке на базе опытных данных. В этом случае наиболее целесообразно представление результатов теоретических исследований в виде безразмерных симплексов или комплексов (критериальных параметров).

Анализ экспериментальных исследований по учету и способам определения влияния суспензии на характеристики турбулентного потока проведен в [1]. В работе показано, что из применявшихся безразмерных параметров усиление или ослабление турбулентности из-за содержания взвеси в потоке наиболее успешно категоризируется при помощи интуитивно предложенного соотношения  $d_p/l_e$ . Этот параметр представляет собой отношение диаметра частицы,  $d_p$ , к характерному размеру больших вихрей,  $l_e$ . В то же время отмечается, что параметр  $d_p/l_e$  не описывает влияния изменения плотности материала частицы и не показывает величины изменения турбулентности. Также показано, что одиночные параметры и ряд безразмерных симплексов, предложенных различными исследователями, еще менее эффективны как критерии классификации изменения мультифазных

потоков, чем  $d_p/l_c$ . Для точного предсказания и описания влияния взвеси на изменение турбулентности авторы [1] используют другие физические подходы.

Ими предлагаются критерии, полученные путем представления и анализа уравнения Навье-Стокса как уравнения, описывающего совместное движение взвешенных частиц и потока. Посредством приведения его к безразмерному виду и методом анализа размерностей получен параметр, модернизирующий критерий Стокса. Он позволяет находить области (сочетания) параметров потока и частиц, где происходит гашение и усиление турбулентности. По сути, это области, в которых частицы движутся несогласованно и согласованно с турбулентными вихрями, которые можно рассматривать как естественные образования с вращательным движением потока.

В работе [1] уравнение движения для потока жидкости, содержащей дисперсные включения, авторы конструируют, записав уравнение Навье-Стокса для отдельно взятого бесконечно малого объема:

$$\frac{DU_i}{Dt} = -\frac{1}{r_f} \cdot \frac{\partial P}{\partial x_i} + n \cdot \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \cdot \partial x_j} - \frac{1}{r_f} \cdot f_i, \quad (2.1)$$

где  $U_i$ ,  $f_i$ ,  $P$ ,  $\rho_f$ ,  $\nu$  – скорость жидкости; силу, связанную с частицами, попавшими в бесконечно малый объем, в  $i$ -ом направлении; давление; плотность; кинематическую вязкость жидкости, соответственно.

Общую силу влияния жидкости на частицы, оказавшиеся внутри выделенного бесконечно малого объема  $\Delta V_{cell}$ , в  $i$ -ом направлении  $f_i$  авторы [1] формулируют как сумму поверхностных сил по этим частицам следующим образом:

$$f_i = \frac{\lim_{\Delta V_{cell} \rightarrow 0}}{\Delta V_{cell}} \frac{1}{\Delta V_{cell}} \int S(\vec{e}_i, \vec{n}_s) dS, \quad (2.2)$$

где единичные вектора  $e_i$  и  $n_s$  ориентированы соответственно в  $i$ -ом и нормальном к поверхности направлениях;  $\Delta V_{cell}$  – величина выделенного бесконечно малого объема.

При этом выражение для силы  $f_i$  трактуется как дельта функция. Указанную силу определяют подобно дельта функции Дирака – она значима на поверхности частиц, когда размеры бесконечно малого объема стремятся к нулю ( $\Delta V_{cell} \rightarrow 0^+$ ), и остается нулем везде вне поверхности частиц. Вместе с тем сила  $f_i$  не может определяться внутри частиц, так как выражение (2.1) конструируется только для сплошной (как бы однородной) фазы. Поэтому приходится обуславливать, что это выражение можно масштабировать на основе среднеобъемного значения  $f_i$ . При этом авторы [1] ссылаются на метод сцепления моментов инерции точечных сил, рассмотренный в работах [2, 3], где использован подобный прием.

С учетом рассмотренных допущений авторы работы получают подходящие безразмерные параметры для классификации изменения турбулентности. После выполнения соответствующих преобразований уравнение (2.1) записывается в безразмерном виде:

$$\frac{DU_i^*}{Dt^*} = -\frac{\partial P^*}{\partial x_i^*} + \frac{1}{Re_L} \cdot \frac{\partial^2 U_i^*}{\partial x_j^* \cdot \partial x_j^*} - \frac{\Theta}{Pa_{Re}} \cdot f_i^{*Re}, \quad (2.3)$$

где  $Pa_{Re} = \left[ (Re_L^2 / Re_p) (r_p / r_f) (d_p / L)^3 \right] / 18$ ,  $\rho_f$  – плотность жидкости,  $\rho_p$  – плотность частицы,  $d_p$  – диаметр частицы,  $L$  – наибольший масштаб по размеру,  $\Theta = \rho_p / \rho_f$  – отношение, через которое выражается масса частиц в единичном объеме;  $f_i^{*Re}$  – безразмерная сила, основанная на числе Рейнольдса и на плотности частицы  $\rho_p$ ; все остальные характеристики со звездочками\* – соответствующие безразмерные величины.

Уравнение (2.3) содержит три безразмерных параметра  $Re_L$ ,  $\Theta$ ,  $Pa_{Re}$ . В соответствии с [1], параметрами, определяющими затухание или усиление турбулентности, являются  $Re_L$  и  $Pa_{Re}$ , а параметр  $\Theta$  считается оказывающим влияние только на величину изменения турбулентной кинетической энергии. Экспериментального подтверждения затухания или усиления турбулентности, которое имело бы место только из-за изменения значения этого параметра, авторами [1] не обнаружено.

В наших исследованиях, которые проводились одновременно с [1], решалась обратная задача. Искались условия, при которых взвешенные частицы могут следовать по линиям тока в искусственно созданных вращающихся потоках, и условия, при которых они сходят с линий тока.

Нами получены сходные безразмерные параметры, определяющие поведение дисперсной части турбулентных потоков.

Практической целью исследований было нахождение параметров для расчетной оценки конструктивного и энергетического совершенства аппаратов, в которых реализуется вращательное движение двухфазного потока. В последнее время предлагаются все новые и новые конструкции таких сепараторов. При этом низкие свойства по очистке и высокая затрата энергии, чем у традиционных конструкций циклонных и вихревых сепараторов, выясняются только при эксплуатации. Так происходит потому, что сейчас степень отделения взвеси в циклонных сепараторах устанавливается опытным путем. В аппаратах с вращательным движением потока степень осаждения возрастет, если добиться увеличения момента инерции частиц. Возрастут и энергетические затраты на очистку. Теоретическое определение степени осаждения позволило бы определять оптимальные параметры очистных устройств на стадии конструирования.

В данной части работы рассматривается задача теоретического расчета эффективности инерционного осаждения частиц из вращающегося потока аэрозоля в циклонах возвратно-поточного типа. Двухфазный поток в циклоне или вихревом аппарате представляет собой крупную унитарную вращающуюся систему. Ее геометрия принципиально задается конструкцией аппарата, а энергетика – энергией входящего потока. Вследствие этого ряд параметров такого вращательного движения мультифазной системы определяется более однозначно, чем при ее вращении внутри естественных турбулентных вихрей потока.

Масштаб вращательного движения мультифазного потока в аппарате соизмерим с его поперечным размером, что на несколько порядков превышает линейный масштаб турбулентности Колмогорова. Энергетические параметры вращающегося потока соизмеримы с величиной его энергии на входе в аппарат. В таких условиях для описания процесса сепарации целесообразно использовать систему из уравнения Навье-Стокса для движения однофазного потока  $\rho_L du/d\tau = \rho_{0L}(1 - \beta\theta)g - \nabla p + \mu \nabla^2 u$  и уравнения движения частиц  $m_p d\dot{w}/d\tau = \dot{F}$ , основанного на законе Ньютона.

В упомянутых уравнениях  $u$  – скорость потока (тангенциальная компонента), м/с;  $\rho_L$ ,  $\rho_{0L}$  – текущая и начальная плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\beta$  – температурный коэффициент объемного расширения, К<sup>-1</sup>,  $\theta$  – разность текущей и начальной температуры потока, К;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости потока, Па·с;  $\tau$  – время, с;  $m_p$ ,  $\dot{w}$  – масса, кг, и скорость, м/с, частицы;  $\dot{F}$  – равнодействующая всех сил, которые могут влиять на ее движение, Н.

При постановке задачи использовался ряд общепринятых упрощений. Не учитываются различия размеров и форм взвешенных частиц, их взаимодействия и влияние на объем, и плотность потока. Существенны сила сопротивления потока, в котором она движется, и сила тяжести. В турбулентных потоках действующие силы могут возникать также за счет энергии турбулентных вихрей. Эпизодически могут иметь место специфичные силы. Решить уравнение движения для общего случая невозможно. Анализ действующих сил показал, что за базовое можно принять взаимодействие силы инерции частицы в криволинейном движении с центробежной силой, создаваемой потоком через воздействие на частицы сил вязкости.

Вследствие использования упрощений теоретический результат нуждается в градуировке по опытным данным. Для этого в работе использованы официальные паспортные характеристики серийных циклонных сепараторов – диаметр отсекаания  $D_{50}$  и дисперсия размеров улавливаемых частиц  $\sigma_d$ . Это наиболее надежная и широко известная информация, установленная посредством строгих испытаний по стандартным методикам на заводах-изготовителях и многократной последующей проверки при эксплуатации. На ее основе процесс выделения частиц из потока, как достоверно свершившийся факт, исследуется в целом. Движущуюся систему рассматриваем с позиции принципа Остроградского-Гамильтона: для действительного начавшегося движения интеграл функции Лагранжа  $L$  (полной энергии как суммы кинетической и потенциальной) за промежуток времени  $\Delta t$  от начального до конечного момента движения принимает экстремальное значение. Можно получить искомый параметр осаждения посредством сопоставления энергетических характеристик потока и частицы в виде их действий как произведения энергий на характерное время. Для физической адекватности найденного параметра действительному процессу необходимо принять к рассмотрению характерный этап сепарации. Физически это момент схода частицы с линии тока, до которого векторы скоростей потока и частицы совпадают. Влияние на эффективность осаждения

дальнейшего перемещения частиц до осаждения на стенке уточняется посредством сопоставления полученного критерия с паспортными характеристиками циклона.

Одна из проблем, затрудняющих получение аналитической зависимости, заключается в сложности математической трактовки реальной трехмерной траектории частиц и потока в циклонах. С учетом того, что центростремительное ускорение движущейся по винтовой линии точки совпадает с нормальным ускорением ее проекции на окружности такого же радиуса, движение потока в пределах кольцевого канала циклона упрощается до вращения в плоскости его поперечного сечения (рис. 1).

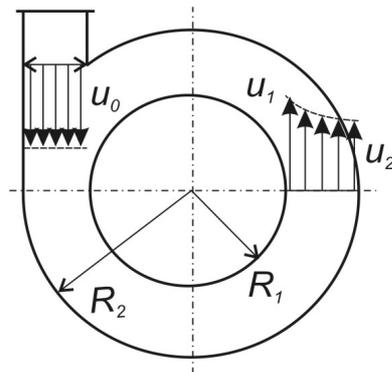


Рис. 1. Двумерная схема движения потока в циклоне:  $u_0$  – скорость потока на входе в циклон;  $u_1, u_2$  – скорости на внутренней и внешней границах кольцевого канала с радиусами  $R_1, R_2$

В двумерной задаче, в поперечном сечении циклона, радиальное распределение тангенциальных скоростей описывается уравнением  $uR^k = \text{const}$ , где  $u$  – скорость потока на расстоянии  $R$  от центра вращения. Значение  $k$  по различным эмпирическим соотношениям, приводимым, например в [4], находится в пределах 0.5-0.65. Далее использована модель вращения потока  $uR^{0.5} = \text{const}$ . По характеру описания движения это модель безвихревого потока, занимающая промежуточное положение между потенциальным движением по круговым траекториям ( $k = 1, uR = \text{const}$ ) и ламинарным вращением с  $u \rightarrow 0$  ( $k = 0, u = \text{const}$ ). Поэтому в рамках принятой модели силы, возникающие из-за турбулентности потока, в момент схода частицы с линии тока правомерно не учитывать.

Комплексы, характеризующие сепарацию частицы, будут представлены в безразмерном виде. Они следуют из 2 уравнений, формулирующих изучаемый процесс. Это уравнение Навье-Стокса (движения криволинейного потока, несущего частицы) с учетом модели вращения  $uR^{0.5} = \text{const}$  и соответствующими радиальными градиентами скоростей и давлений, и уравнение движения частицы на основе закона Ньютона, в котором результирующая сила тождественна силе сопротивления. При получении безразмерных параметров использованы основные методы теории подобия – анализа размерностей и масштабных преобразований.

Принятую модель вращения конкретизируют, сопоставив расход газа в кольцевом канале высотой  $H$  на входе циклона и на некотором расстоянии от входа:

$$uR^{0.5} = u_0 \left( R_2^{0.5} + R_1^{0.5} \right) / 2. \tag{2.4}$$

В (2.4) представляется форма радиального градиента скорости. Причиной его появления служит созданная потоком центростремительная сила. Связь между ней и градиентом скорости определяет соотношение между создающими ее силами вязкости и инерционными силами частиц, которые возникают при вовлечении их в движение потока. Эту связь удобно представить через описание неравномерности радиального распределения давлений  $p = P/S$ , Па, в потоке ( $P$  – сила давления,  $H$ , направленная нормально к площадке  $S$ ,  $m^2$ ):

$$\text{grad } p = dp/dR = dm (du/d\tau) / dv = \rho_G du/d\tau, \tag{2.5}$$

где  $m$  – масса, кг, объема  $v$ ,  $m^3$ , несущего потока, и  $\rho_G$  – его плотность. С учетом принятых упрощений  $du/d\tau \approx u^2/R$ ,  $dp = (\rho_G u^2/R) dR$ , и окончательно

$$dp = \left[ \rho_G u_0^2 \left( R_2^{0.5} + R_1^{0.5} \right)^2 / 4 \right] \frac{dR}{R^2}, \text{ Па.} \tag{2.6}$$

Выделим группу постоянных величин  $\rho_G u_0^2 (R_2^{0.5} + R_1^{0.5})^2 / 4$ , Па·м. Она образует характерный параметр  $f_R$ , который будем рассматривать как градиент силы в радиальном направлении вращающегося потока, Н/м. В этом направлении  $u_0$  и  $\rho_G$  на входе аппарата неизменны. Поэтому начальные градиенты силы  $f_R$  для циклонов любого типа имеют свои строго определенные величины, численно характеризуют и поток, и аппарат. Параметр  $f_R$  будет использован как базовый для получения характеристики энергетического совершенства завихрительных устройств. Отношение

$$f_R / u_0 = \rho_G u_0 (R_2^{0.5} + R_1^{0.5})^2 / 4 = a_c, \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad (2.7)$$

можно представить как действие над единицей объема потока в аппарате, соответствующее интегралу функции Лагранжа  $L$  (полной энергии движущегося потока) по характерному времени. Потенциальная энергия в пределах кольцевого канала циклона изменяется несущественно. При стационарности сепарации удельное действие  $a_c$  можно представить произведением начальной удельной кинетической энергии  $\rho_G u_0^2 / 2$  на характерное для конструкции аппарата время  $(R_2^{0.5} + R_1^{0.5})^2 / (2u_0)$ .

Посредством масштабирования  $a_c$  легко привести к безразмерному виду, отнеся к естественному масштабу удельного (на единицу объема) действия потока – динамическому коэффициенту вязкости  $\mu$ . Физически отношение  $a_c / \mu$  показывает, сколько единиц энергии поступает с потоком. Также выявляется достаточность поступившей энергии для формирования потока в циклоне с соответствующими геометрическими параметрами. Результатом является безразмерный комплекс, характеризующий действие над вращающимся в циклоне потоком, структура которого соответствует критерию Рейнольдса:

$$\text{Re}_c = a_c / \mu = f_R / u_0 \eta = \rho_G u_0 (R_2^{0.5} + R_1^{0.5})^2 / (4\mu). \quad (2.8)$$

В  $\text{Re}_c$  входят основные характеристики потока и циклона. Это безразмерный энергетический параметр потока и одновременно – безразмерная характеристика энергетического совершенства аппарата как завихрителя. Параметр  $\text{Re}_c$  может быть получен и непосредственно путем приведения уравнения Навье-Стокса для газовой фазы как несжимаемой жидкости к безразмерному виду. Сопоставив с  $\text{Re}_c$  аналогичную характеристику действия частиц в потоке, можно найти критериальный параметр осаждения взвеси из него. Энергетическую характеристику  $f_{Rp}$  частицы получим из уравнения радиального градиента действующей на нее центростремительной силы  $F_1$ . Частицы промышленной пыли приемлемо считать сферическими. За редким исключением они имеют компактную форму. Для частицы диаметром  $D_p$  и плотностью  $\rho_p$ :

$$f_{Rp} = dF_1 / dR_2 = F_1 / R_2 = \pi (\rho_p - \rho_G) D_p^3 u_0^2 / (6R_2^2) \text{ Па} \cdot \text{м}. \quad (2.9)$$

В (2.9) учтена масса  $\rho_G \pi D_p^3 / 6$  вытесненного частицей объема газа. Для промышленных выбросов это уточнение ничтожно мало, но существенно при очистке жидких сред.

Учтем в удельном действии частицы  $a_p$  интенсивность ее вовлечения во вращательное движение потока. При отсутствии посторонних воздействий на частицы поток реализует свое действие через вязкость, т.е. через удары молекул об их поверхность. Если передаваемый импульс достаточен, они приобретут направление и скорость окружающих молекул, т.е. параметры несущей линии тока. При определении  $a_p$  учтем влияние вязкости через время релаксации  $\tau_p = (\rho_p - \rho_G) D_p^2 / 18\mu$ , используя как характерный скоростной масштаб скорость  $u_{p\tau_p} = D_p / \tau_p$ . Она представляет зависимость инерционных свойств и сопротивления частицы от ее параметров и параметров потока. Это скорость, с которой частица за время релаксации проходила бы расстояние, равное ее диаметру, порядок которой для мелких частиц составляет  $(1 \dots 10^{-1})$  м/с, для средних и крупных –  $(10^{-2} \dots 10^{-3})$  м/с. Итак, удельное действие частицы

$$a_p = f_{Rp} / u_{p\tau_p} = 3\pi\mu (u_0 \tau_p / R_2)^2, \text{ Па} \cdot \text{с}. \quad (2.10)$$

Комплекс  $\sqrt{3\pi} u_0 \tau_p / R_2$  имеет структуру числа Рейнольдса и показывает отношение инерционных сил частицы в криволинейном движении к преодолеваемым силам сопротивления. Представим его как инерционное число  $\text{Re}_p^{\text{in}}$  частицы. Тогда ее удельное безразмерное действие  $a_p / \mu = (\text{Re}_p^{\text{in}})^2$ . Возможность сепарации из-за того, что она не сможет следовать за линией

тока радиусом  $R_2$  и продолжит движение по касательной, должно показать отношение безразмерных действий частицы  $(Re_p^{in})^2$  и потока  $Re_c$ . Оно также дает комплекс со структурой критерия Рейнольдса:

$$\frac{(Re_p^{in})^2}{Re_c} = \frac{12\pi\mu(u_0\tau_w/R_2)^2}{\rho_G u_0 (R_2^{0.5} + R_1^{0.5})^2} \cong \frac{u_0 (\rho_p - \rho_G)^2 D_p^4}{27\rho_G R_2^3 \mu}. \quad (2.11)$$

В выводе принято распространенное значение параметра  $R_1/R_2=0,59$ . При другом соотношении  $R_1/R_2$  изменится численный коэффициент в знаменателе (2.11), а комплекс  $u_0 (\rho_p - \rho_G)^2 D_p^4 / \rho_G R_2^3 \mu \equiv Re_r$  останется прежним. В криволинейных потоках значения критерия  $Re_r$  должны соответствовать степени осаждения частиц пыли и могут использоваться для ее оценки. Проверка работоспособности критерия проведена по паспортным данным 11 типов возвратно-поточных циклонов, широко используемых в России для очистки промышленных выбросов. Они характеризуются достоверно известными параметрами осаждения частиц, что позволяет выполнить тарировку чисел  $Re_r$ . К примеру, один из распространенных типов циклонов – ЦН-15, имеет следующие каталожные параметры очистки (по [5]): диаметр частиц, улавливаемых на 50 %,  $D_{50}=4,5 \cdot 10^{-6} м$ , логарифм его дисперсии  $lg\sigma_\eta=0,352$ . При плотности выбросов  $\rho_G=1,293 кг/м^3$ , дисперсии размеров взвешенных частиц  $\sigma_p=2,2$  для степени очистки 99 % параметр осаждения  $x=2,4$ . Диаметр  $D_{99}$  частиц, улавливаемых на 99 %, найденный из соотношения  $x = lg(D_{99}/D_{50}) / \sqrt{(lg\sigma_\eta)^2 + (lg\sigma_p)^2}$ , составит  $70 \cdot 10^{-6} м$ .

Значения  $Re_r$  при относительной скорости потока  $U_0 = u_0/w_{opt}=0.5-4$  ( $w_{opt}$  – оптимальная скорость, м/с) представлены для частиц с  $D_p = (2-150) \cdot 10^{-6} м$  в циклоне ЦН-15 на Рис. 2.

Расчеты показали соответствие степеням осаждения частиц определенных значений  $Re_r$ . Со степенью осаждения 99 % может быть сопоставлено число  $Re_r \approx 4 \cdot 10^{-4}$ , а с 50 % –  $7 \cdot 10^{-9}$ . Увеличению степени очистки на 10 % соответствует его рост на  $\sim 8 \cdot 10^4$ . Изменения  $Re_r$  аналогичны для всех типоразмеров одного вида циклонов. Прослеживается также зависимость от энергетических затрат:  $Re_{r,99}$  уменьшается с увеличением сопротивления аппарата. Это можно видеть по ЦН-24, имеющему наименьшее сопротивление среди циклонов ЦН. Следует заметить, что в структуру  $Re_r$  коэффициент гидравлического сопротивления циклона не входит.

Расчеты чисел  $Re_r$  по другим типам циклонов показали, что для них также прослеживается корреляция  $Re_{r,99}$  от энергетических затрат: с увеличением сопротивления  $Re_{r,99}$  снижается. К примеру, в циклоне ВЦНИИОТ с самым низким из исследованных коэффициентом сопротивления, при оптимальной скорости потока могут быть осаждены на 50 % частицы с параметром  $Re_r$  не ниже  $1,05 \cdot 10^{-7}$ , а на 99 % – только крупных частиц с  $Re_r > 3,3 \cdot 10^{-3}$ . По (2.8) можно также находить минимальную скорость потока и соответствующие затраты энергии, обеспечивающие требуемую степень осаждения частиц данного размера в исследуемом аппарате. Предыдущий пример показывает, что для очистки в циклоне ВЦНИИОТ на 99 % частиц с размером  $D_p=8.6 \cdot 10^{-6} м$ , имеющих  $Re_r=1,05 \cdot 10^{-7}$  при  $w_{opt}=4 м/с$ , надо увеличить ее на 4 порядка, что реально недостижимо.

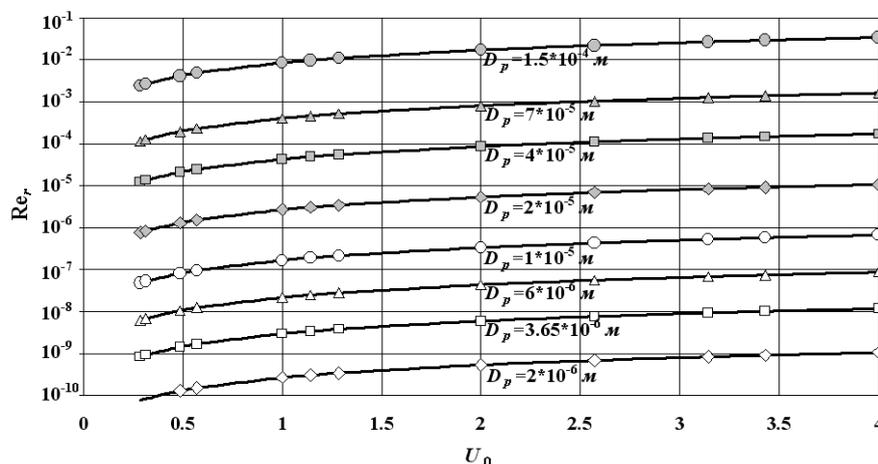


Рис. 2. Зависимость  $Re_r$  от безразмерной скорости потока  $U_0$  для частиц диаметром  $D_p = (2 \dots 150) \cdot 10^{-6} м$  в циклоне ЦН-15

Проведенные исследования показывают, что параметр  $Re_r$  позволяет находить численные значения параметров очистки в сепараторах с вращательным движением многофазных потоков расчетным путем. Несмотря на конструктивные различия рассмотренных аппаратов, их расчеты на основе  $Re_r$  приводят к результатам, близким к опытным. Поэтому значение числа  $Re_r$  для них может рассматриваться как критериальный параметр. С его помощью могут быть найдены фракционные коэффициенты очистки примеси, если известны параметры потока и конструктивные параметры аппарата, определяющие средний радиус кривизны потока.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tanaka T., Eaton J.K. Classification of Turbulence Modification by Dispersed Spheres Using a Novel Dimensionless Number. PRL, 101, 114502 – 1-4, 2008.
2. Squires K.D., Eaton J.K. Phys. Fluids A 2, 1191, 1990.
3. Druzhinin O.A. Phys. Fluids 13-12, 3738, 2001.
4. Пирумов А.И. Аэродинамические основы инерционной сепарации. – М.: Госстройиздат, 1961. – 207 с.
5. Зиганшин М.Г., Колесник А.А., Посохин В.Н. Проектирование аппаратов пылегазоочистки. – М.: Экопресс-ЗМ, 1998. – 505 с.