

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ В МАЛОГАБАРИТНЫХ ВИХРЕВЫХ АППАРАТАХ

Склабинский В.И., д.т.н., проф., Артюхов А.Е., к.т.н., ст. преп.

Сумский государственный университет, г. Сумы

40007, г. Сумы, ул. Римского-Корсакова, 2

E-mail: pohnp@yandex.ru

Розглядається алгоритм обчислення основних гідродинамічних характеристик руху дисперсної фази під дією закрученого вісесиметричного газового потоку. Аналізується вплив технологічних і конструктивних параметрів на характер зміни складових повної швидкості руху дисперсної фази.

Ключові слова: двофазний вихровий потік, гідродинаміка, розрахунок.

The algorithm of definition of the basic hydrodynamic characteristics of disperse phase movement under the influence of twirled symmetry axis gas stream is considered. Influence technological and design data on character of change compound full speed of movement of a disperse phase is analyzed.

Keywords: a diphasic vortical stream, hydrodynamics, calculation.

Введение. Гидродинамика рабочего пространства вихревого гранулятора оказывает решающее влияние на время пребывания капли (гранулы) в аппарате и на его высоту [1]. Поиск оптимального гидродинамического режима работы вихревых аппаратов позволит создать оборудование с минимальными габаритами, которые смогут обеспечить необходимое время пребывания капли (гранулы) в аппарате [2]. Расчёт траекторий движения дисперсной фазы на основании полученных данных по гидродинамике позволяет определить оптимальную конфигурацию рабочего пространства аппарата. Решение этой задачи является актуальным в современных тенденциях перехода новых производств на принципы энергоэффективности [3].

Цель работы. Представленная работа является продолжением исследования закономерностей гидродинамики однофазных и двухфазных вихревых потоков в малогабаритных грануляторах [4,5]. Цель работы – изучение поля скоростей движения капель (гранул) под действием вихревого газового потока с известными гидродинамическими характеристиками [6] на основании аналитического решения уравнений математической модели и результатов эксперимента.

Материал и результаты исследования.

Методика расчёта гидродинамических характеристик дисперсной фазы в вихревом газовом потоке.

Для моделирования двухфазных течений, в которых одна из рассматриваемых фаз представлена в виде дисперсных частиц используется подход Лагранжа [7]. На основе этого метода рассматривается движение дисперсной фазы под действием сплошной фазы.

Поток сплошной фазы, течение которого в данном случае, моделируется системой уравнений Навье-Стокса и уравнением неразрывности потока [8], отдаёт часть момента количества движения дискретным частицами.

Система дифференциальных уравнений движения капли по действием массовых сил F_r, F_φ, F_z в цилиндрических координатах (r, φ, z) [9]

$$\begin{cases} j_r = \frac{F_r}{m} = \frac{dW_r}{dt} - \frac{W_\varphi^2}{r}; \\ j_\varphi = \frac{F_\varphi}{m} = \frac{dW_\varphi}{dt} + \frac{W_r W_\varphi}{r}; \\ j_z = \frac{F_z}{m} = \frac{dW_z}{dt}. \end{cases} \quad (1)$$

где W_r, W_φ, W_z - радиальная, окружная и осевая составляющие полной скорости дисперсной фазы.

Уравнение динамики движения капли в общем виде

$$m \frac{d\vec{W}}{dt} = \vec{F}_m + \vec{F}_c + \vec{F}_u, \quad (2)$$

где $\vec{F}_m, \vec{F}_c, \vec{F}_u$ - сила притяжения, сила аэродинамического сопротивления и центробежная сила соответственно.

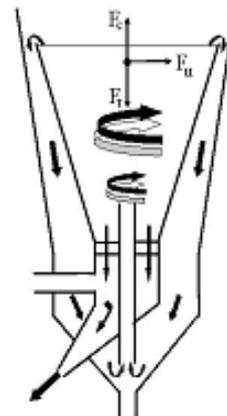


Рисунок 1 – Силы, действующие на дисперсную фазу в рабочей области вихревого гранулятора

Сила тяжести, которая действует на частицу (гранулу)

$$F_m = m \cdot g, \quad (3)$$

где m – масса частицы, g – ускорение свободного падения.

Сила аэродинамического сопротивления для развитого турбулентного движения пропорциональна квадрату скорости [9]

$$F_c = c \cdot \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \cdot \frac{\rho_z \cdot (V - W)^2}{2} \quad (4)$$

где d – диаметр дисперсной фазы (частицы), ρ_z – плотность сплошной фазы (газового потока), V – скорость газового потока, W – скорость дисперсной фазы (частицы); c – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы газовому потоку.

Сила аэродинамического сопротивления, полученная с использованием линейного коэффициента сопротивления ψ вместо квадратичного коэффициента аэродинамического сопротивления c с учётом критерия Стокса [10]

$$F_c = \frac{3}{4} \cdot \frac{\psi \cdot \mu_z}{\rho_c \cdot d_c} \cdot (V - W), \quad (5)$$

где μ_z – вязкость сплошной фазы, ρ_c – плотность дисперсной фазы.

Коэффициент аэродинамического сопротивления, который характеризуется режимом движения и размером капли определяется по зависимости [11]

$$\psi = \begin{cases} 24 / (Re + 4 / Re^{0,33}) & Re < 1000 \\ 0,44 & Re \geq 1000 \end{cases} \quad (6)$$

Центробежная сила, действующая на частицу

$$F_{\varphi} = \frac{m \cdot W_{\varphi}^2}{r}. \quad (7)$$

Исходя из осесимметричности закрученного газового потока в рабочем пространстве вихревого гранулятора, безотрывности течения и стационарности потока целесообразным будет выбор цилиндрической системы координат, которая позволит провести некоторые упрощения в системе уравнений, описывающих гидродинамику двухфазного вихревого потока [12].

Уравнение движения капли в цилиндрических координатах

$$\begin{cases} \frac{dW_r}{dt} = \frac{W_{\varphi}^2}{r} + \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_z}{4 \cdot \rho_c \cdot d_c} (V_r - W_r); \\ \frac{dW_{\varphi}}{dt} = -\frac{W_r W_{\varphi}}{r} + \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_z}{4 \cdot \rho_c \cdot d_c} (V_{\varphi} - W_{\varphi}); \\ \frac{dW_z}{dt} = -g + \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_z \cdot \rho_z}{4 \cdot \rho_c \cdot d_c} (V_z - W_z). \end{cases} \quad (8)$$

где V_r, V_{φ}, V_z – радиальная, окружная и осевая составляющие полной скорости сплошной фазы.

Полученная система уравнений имеет в своем составе три уравнения и четыре неизвестных значения, которые необходимо определить.

Первой производной по перемещению от времени является скорость движения капли по соответствующим направлениям

$$\frac{dr}{dt} = W_r; \quad \frac{d\varphi}{dt} = W_{\varphi}; \quad \frac{dz}{dt} = W_z. \quad (9)$$

Откуда

$$dt = \frac{dr}{W_r}; \quad dt = \frac{d\varphi}{W_{\varphi}}; \quad dt = \frac{dz}{W_z}. \quad (10)$$

С учетом выражений (10) система уравнений (8) запишется в виде

$$\begin{cases} \frac{dW_r}{dr} W_r = \frac{W_{\varphi}^2}{r} + \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_z}{4 \cdot \rho_c \cdot d_c} (V_r - W_r); \\ \frac{dW_{\varphi}}{d\varphi} W_{\varphi} = -\frac{W_r W_{\varphi}}{r} + \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_z}{4 \cdot \rho_c \cdot d_c} (V_{\varphi} - W_{\varphi}); \\ \frac{dW_z}{dz} W_z = -g + \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_z \cdot \rho_z}{4 \cdot \rho_c \cdot d_c} (V_z - W_z). \end{cases} \quad (11)$$

Левая часть второго уравнения системы (11) при условиях осесимметричности вихревого потока равняется нулю:

$$-\frac{W_r W_{\varphi}}{r} + \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_z \cdot \rho_z}{4 \cdot \rho_c \cdot d_c} (V_{\varphi} - W_{\varphi}) = 0. \quad (12)$$

Введем обозначение

$$a = \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_z}{4 \cdot \rho_c \cdot d_c}. \quad (13)$$

Таким образом

$$-\frac{W_r W_{\varphi}}{r} + a \cdot (V_{\varphi} - W_{\varphi}) = 0. \quad (14)$$

Решим уравнение (14) относительно W_{φ}

$$W_{\varphi} = \frac{a \cdot r \cdot V_{\varphi}}{a \cdot r + W_r}. \quad (15)$$

С учетом (15) первое уравнение системы (11) будет иметь следующий вид:

$$\frac{dW_r}{dr} W_r = \frac{\left(\frac{a \cdot r \cdot V_{\varphi}}{a \cdot r + W_r} \right)^2}{r} + a \cdot (V_r - W_r). \quad (16)$$

Уравнение (16) позволяет установить закономерность изменения окружной составной скорости капли при задании данных для расчета ($\psi, \mu, \rho_c, d_c, \varphi, Q, z$) и значений окружной и угловой составляющих скорости газового потока, которые известны предварительно [6].

Введя обозначение

$$b = \psi \cdot \frac{3 \cdot \mu_z \cdot \rho_z}{4 \cdot \rho_u \cdot d_u} \quad (17)$$

Получим следующую запись третьего уравнения системы (11)

$$\frac{dW_z}{dz} W_z = -g + b(V_z - W_z) \quad (18)$$

Анализ результатов расчёта.

Численное решение уравнений математической модели позволило получить основные функциональные зависимости гидродинамических характеристик дисперсной фазы в малогабаритном вихревом коническом аппарате с переменным по высоте сечением рабочего пространства, которые демонстрируют влияние геометрии рабочего пространства аппарата и технологических показателей на поля скоростей дисперсной фазы (рис. 2-9).

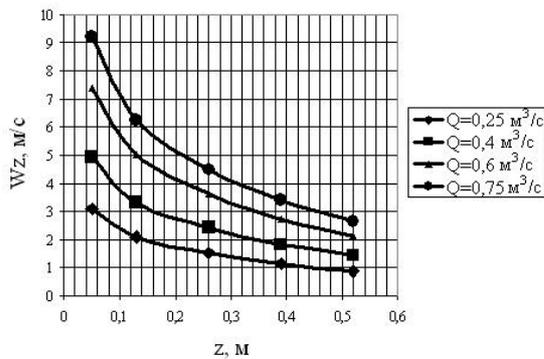


Рисунок 2 – Расчётный характер изменения осевой составляющей скорости дисперсной фазы в зависимости от расхода сплошной фазы

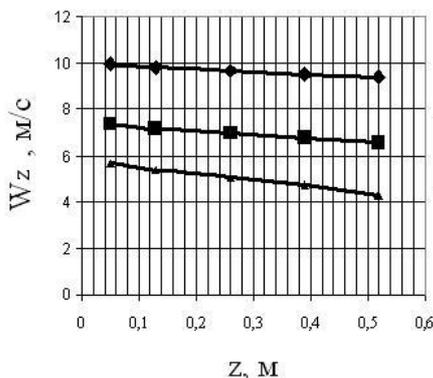


Рисунок 3 – Расчётный характер изменения осевой составляющей скорости дисперсной фазы в зависимости от угла раскрытия конуса

Анализ характера изменения осевой составляющей скорости дисперсной фазы показывает монотонное уменьшение рассматриваемой составляющей скорости аналогично изменению осевой составляющей скорости газового потока в аппарате с переменным по высоте рабочего пространства сечением [6], входящей в состав уравнения (17), что объясняется законом сохранения момента количества движения [13], согласно

которому происходит передача части момента количества движения от сплошной (газовой) к дисперсной (капле, грануле) фазе. Данный закон сохранения запишем в виде

$$M_z = M'_z + M_q \quad (18)$$

где M_z - момент количества движения сплошной (газовой) фазы до взаимодействия с дисперсной фазой (частицами), M'_z - момент количества движения сплошной (газовой) фазы после взаимодействия с дисперсной фазой (частицами), M_q - момент количества движения дисперсной фазы (частиц) после взаимодействия со сплошной (газовой) фазой.

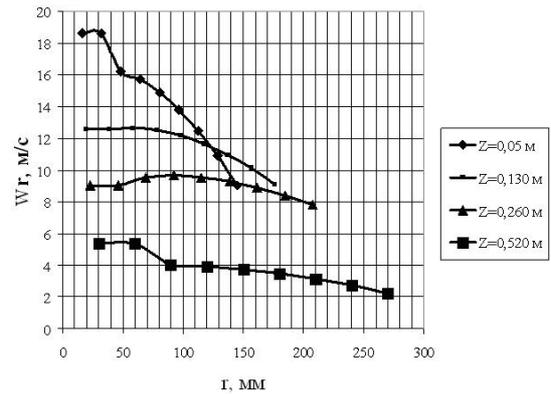


Рисунок 4 – Расчётный характер изменения радиальной составляющей скорости дисперсной фазы в зависимости от высоты сечения

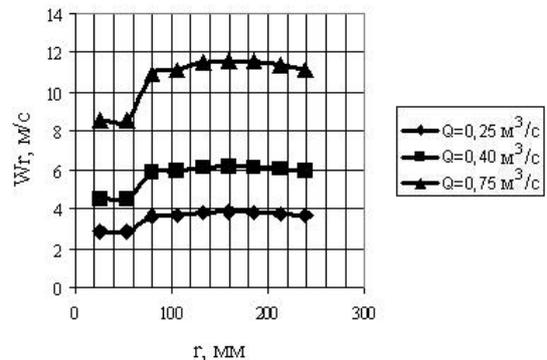


Рисунок 5 – Расчётный характер изменения радиальной составляющей скорости дисперсной фазы в зависимости от расхода сплошной фазы

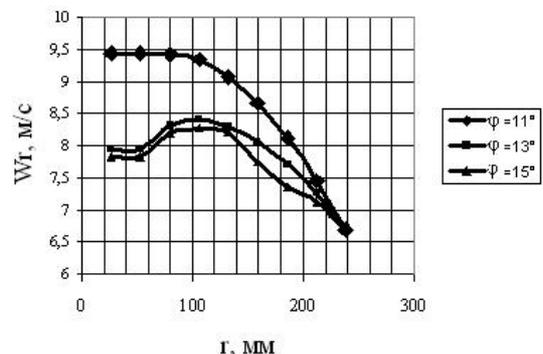


Рисунок 6 – Расчётный характер изменения радиальной составляющей скорости дисперсной фазы в зависимости от угла раскрытия конуса

Анализ функциональных зависимостей радиальной составляющей скорости дисперсной фазы от набора технологических и геометрических параметров показывает сходство кривой с восходящим участком на кривой, которая показывает изменение окружной составляющей скорости сплошной фазы [6], входящей в состав уравнения (16). Таким образом, окружная составляющая скорости сплошной фазы оказывает существенное влияние на рассматриваемую составляющую скорости дисперсной фазы.

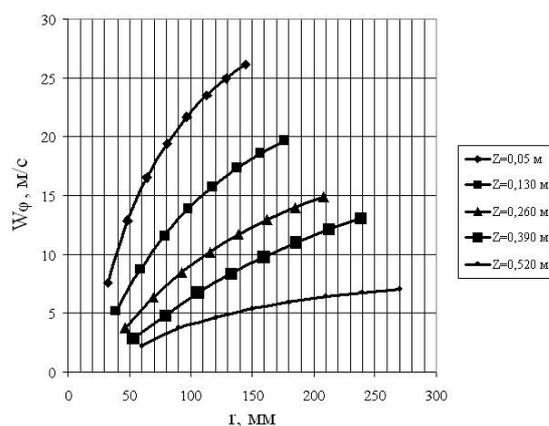


Рисунок 7 – Расчётный характер изменения окружной составляющей скорости дисперсной фазы по высоте сечения рабочего пространства

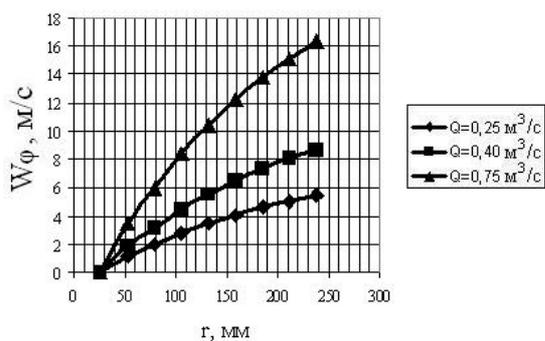


Рисунок 8 – Расчётный характер изменения окружной составляющей скорости дисперсной фазы в зависимости от расхода сплошной фазы

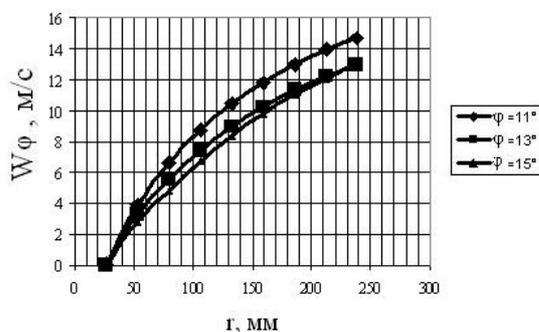


Рисунок 9 – Расчётный характер изменения окружной составляющей скорости дисперсной фазы в зависимости от угла раскрытия конуса

Анализ рис. 7-9 показывает монотонное возрастание окружной составляющей скорости дисперсной фазы по радиусу текущего сечения.

Визуализация данных эксперимента.

На рис. 10 приведена картина развития вихревого взвешенного слоя при выходе аппарата на установившийся режим.

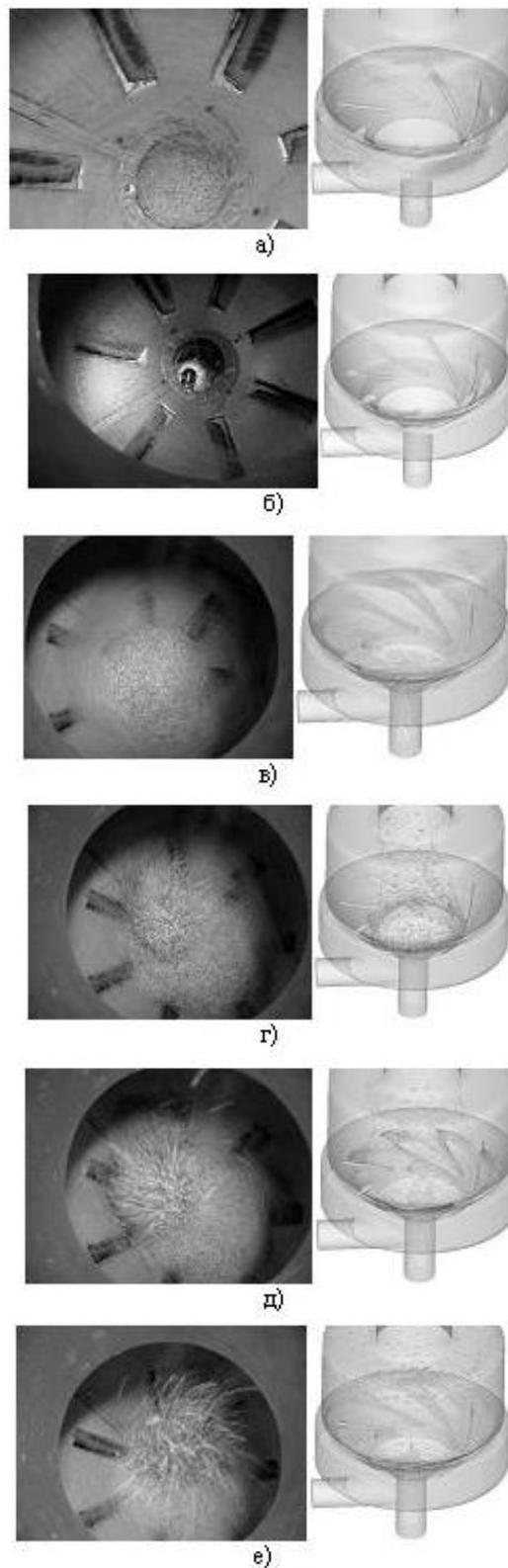


Рисунок 10 – Экспериментальные исследования процесса развития вихревого взвешенного слоя в коническом аппарате

Анализ траектории перемещения дисперсной фазы в горизонтальной и вертикальной плоскостях в вихревом аппарате позволяет выделить зоны повышения интенсивности движения и зоны минимальных значений скоростных показателей, что позволяет подобрать оптимальный набор технологических параметров и геометрических характеристик аппарата [13].

Выводы. 1. По результатам решения уравнений математической модели определены основные гидродинамические параметры движения дисперсной фазы в малогабаритных вихревых аппаратах и зависимость их от основных технологических параметров процесса и геометрии рабочего пространства аппарата.

2. Полученные результаты расчёта позволяют определить траекторию движения дисперсной фазы в вихревом газовом потоке в зависимости от технологических параметров протекания процесса и геометрии рабочего пространства вихревого аппарата.

3. Результаты обработки данных видеосъёмки с определением значения скорости движения дисперсной фазы в рабочем пространстве вихревого аппарата и траектории движения дисперсной фазы дают возможность сопоставить результаты решения уравнений математической модели с результатами эксперимента с обобщением представленных данных для дальнейшего использования в методике инженерного расчёта.

4. Анализ экспериментальных и теоретических данных позволил спроектировать опытно-промышленную технологическую линию получения гранулированного продукта с малогабаритным вихревым аппаратами (рис.11).

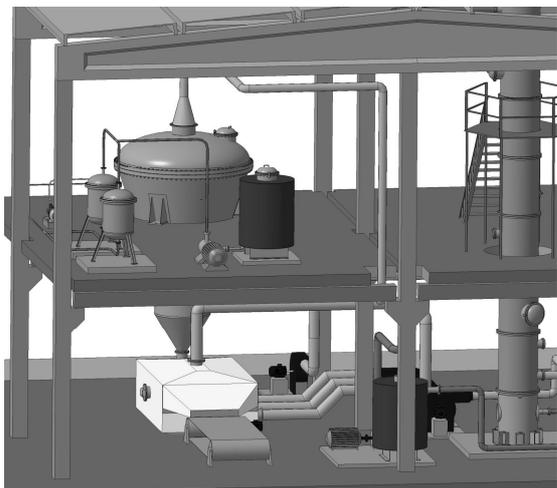


Рисунок 11 – Технологическая линия получения гранулированного продукта безбашенным методом

ЛИТЕРАТУРА

1. Артюхов А.Є. Аналіз результатів дослідження гідродинаміки робочої камери вихрового гранулятора / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський // Тези доповідей III Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Хімія та сучасні технології». –

Дніпропетровськ: Друкарня ДВНЗ УДХТУ, 2007. – С. 22.

2. Жеба К.В. Гідродинаміка двофазних вихрових потоків. Вплив на габарити грануляційного обладнання / К.В. Жеба, В.І. Склабінський, А.Є. Артюхов // Хімічна промисловість України. – 2009. – № 4. – с. 47-52.

3. Артюхов А.Є. Высокоэффективные вихревые аппараты в малотоннажных производствах гранулированных продуктов / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський // Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии: сб. научных трудов XX Международной научно-технической конференции. – Минск, 2008. – С. 272–277.

4. Артюхов А.Є. Розробка методики інженерного розрахунку вихрових грануляторів / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський // Вопросы химии и химической технологии. – 2007. – №5 – С. 209–211.

5. Артюхов Артем. Гідродинаміка робочого простору малогабаритних вихрових грануляторів / Артем Артюхов, Всеволод Склабінський // Збірник наукових праць: Одинадцята наукова конференція «Львівські хімічні читання - 2007». – Львів: Видавничий центр львівського національного університету імені Івана Франка, 2007. – С. У3.

6. Склабінський В.І. Розрахунок гідродинамічних параметрів закручених потоків у вихрових грануляторах аналітичним методом / В.І. Склабінський, А.Є. Артюхов // Вісник Сумського державного університету. – 2008. – № 3. – С. 62–70.

7. Щукин В.К. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах / В.К. Щукин, А.А. Халатов. – М.: Машиностроение, 1982. – 200 с.

8. Халатов А.А. Теория и практика закрученных потоков / Халатов А.А. – К.: Наукова думка, 1989. – 192 с.

9. Горбис З.Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков / Горбис З.Р. – М.: Энергия, 1970. – 424 с.

10. Зверев Н. И. О движении твердой частицы в потенциальном вращающемся потоке / Н. И. Зверев, С. Г. Ушаков // Инженерно-физический журнал. – 1968. – том 14. – № 1. – С. 90–93.

11. Артюхов А.Є. Теоретичні основи дослідження руху газового потоку у вихровому грануляторі / А.Є. Артюхов // Збірник тез доповідей XXII-й наукової конференції країн СНД "Дисперсные системы" – Одеса, 2006. – С. 40–41.

12. Холин Б.Г. Гидродинамика двухфазных потоков в вихревом противоточном маассообменном аппарате / Б.Г. Холин, И.А. Ковалёв, В.І. Склабінський // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 1981. – Том XXV. – Выпуск 7. – Отдельный оттиск.

13. Артюхов А.Є. Результати експерименту та програмного моделювання стосовно гідродинаміки вихрових потоків / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – Ч. II, Вип.10. – С. 36.