

ГИДРОДИНАМИКА АППАРАТОВ С ВИХРЕВЫМИ И ВЫСОКОТУРБУЛИЗИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ

Коробченко К.В., магистрант,
Артюхов А.Е., канд. техн. наук, старший преподаватель,
Ляпошенко А.А., канд. техн. наук, доцент,
Склабинский В.И., д-р техн. наук, профессор
Сумский государственный университет, г. Сумы

Представлена область применения и основные преимущества аппаратов вихревыми и высокотурбулизированными потоками в современной промышленности. Рассмотрены конструктивные особенности различных аппаратов с интенсивной гидродинамикой. Выполнен анализ способов математического моделирования физических процессов. Приведены пример расчёта гидродинамики вихревого аппарата для получения гранулированных продуктов и результаты компьютерного моделирования гидродинамических процессов в сепарационном оборудовании.

The scope and the basic advantages of devices by vortical and turbulent streams of high intensity in the modern industry are presented. Design features of various devices with intensive hydrodynamics are considered. The analysis of ways of physical processes mathematical modeling is made. Examples of calculation of hydrodynamics of the vortical device for reception of the granulated products and results of computer modeling of hydrodynamic processes in separation equipment are shown.

Ключевые слова: вихревой, высокотурбулизированный, гидродинамика, расчёт, моделирование.

Рост интереса к использованию вихревых и высокотурбулизированных потоков в тепломассообменной технике химических и нефтеперерабатывающих производств связан с возможностью осуществления процессов с большей интенсивностью при уменьшении габаритных размеров и объёмов рабочего пространства аппаратуры [1]. Исследования гидродинамики вихревых тепломассообменных аппаратов связаны с тем, что гидродинамическая обстановка в технологических аппаратах может весьма существенно влиять на интенсивность протекания процесса и качественные показатели. Во всех случаях существенно важным является увеличение межфазной поверхности и относительной скорости движения фаз.

Поиск новых способов организации движения вихревых и высокотурбулизированных потоков в оборудовании с развитой гидродинамикой является актуальной и перспективной задачей (рис.1).

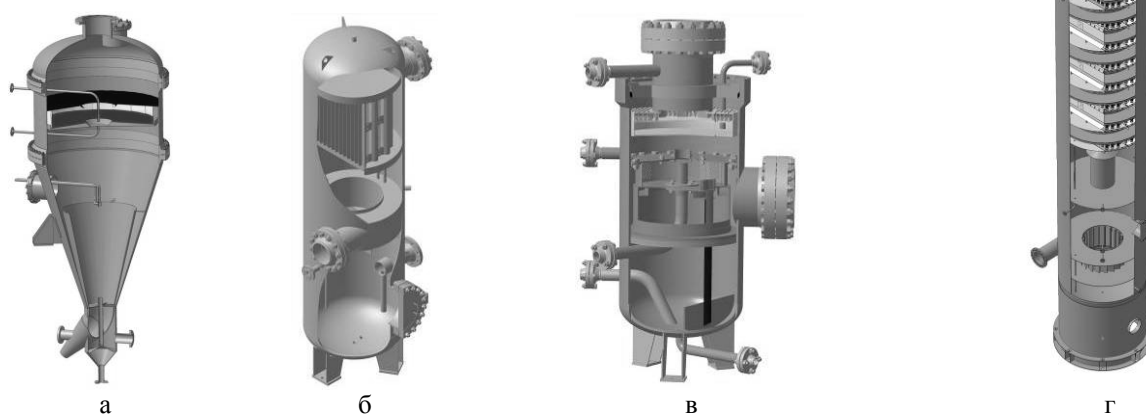


Рис. 1 – Аппараты и вихревыми и высокотурбулизированными потоками:

а - вихревой гранулятор с жидкостно-кольцевым сепаратором [2,3]; б – инерционно-фильтрующий газо-сепаратор [4]; в – абсорбер с вихревым распыливающим противоточным массообменным аппаратом (ВРПМА) [5]; г – многофункциональный абсорбер (МФА) с вихревыми массообменно-сепарационными контактными ступенями [6].

Вихревые аппараты характеризуются интенсивными воздушными потоками, которые создаются разгонными элементами. При этом потоки имеют характер пространственно-объемных завихрений с периодически циклическим изменением как величины, так и направления, что положительно влияет на процесс, проходящий в аппарате.

В вихревом аппарате процесс теплообмена будет проходить в резко выраженном турбулентном дисперсном потоке, в котором присутствует газовая, твердая и жидкая фазы. Высокая турбулентность потока позволяет вести процесс при одинаковых условиях для всех частиц.

Активные гидродинамические режимы в сочетании с возможностью управления временем пребывания твердой фазы определяют высокие технико-экономические показатели аппаратов такого типа.

В основе расчета гидродинамики вихревых и высокотурбулизованных потоков лежат классические уравнения гидродинамики, в частности, система дифференциальных уравнений Навье-Стокса, дополненная уравнением неразрывности потока, и система дифференциальных уравнений движения дисперсной фазы. Для цилиндрической системы координат (r, φ, z) в случае осесимметричного движения потоков в аппарате под действием массовых сил F_r, F_φ, F_z они будут иметь вид [7]:

- система дифференциальных уравнений Навье-Стокса и уравнение неразрывности потока

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\varphi^2}{r} = F_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + E \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r^2} \right); \\ \frac{\partial V_\varphi}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} - \frac{V_r V_\varphi}{r} = F_\varphi + E \left(\frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - \frac{V_\varphi}{r^2} \right); \\ \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + E \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} \right). \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{V_r}{r} = 0, \quad (2)$$

где V_r, V_φ, V_z - радиальная, окружная и осевая составляющие полной скорости сплошной фазы, м/с; p - давление, Па; ρ - плотность движущейся среды, кг/м³; E - коэффициент турбулентной вязкости в соответствии с гипотезой Буссинеска.

-система дифференциальных уравнений движения дисперсной фазы массой m

$$\left\{ \begin{array}{l} j_r = \frac{F_r}{m} = \frac{\partial W_r}{\partial t} - \frac{W_\varphi^2}{r}; \\ j_\varphi = \frac{F_\varphi}{m} = \frac{\partial W_\varphi}{\partial t} + \frac{W_r W_\varphi}{r}; \\ j_z = \frac{F_z}{m} = \frac{\partial W_z}{\partial t}. \end{array} \right. \quad (3)$$

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

При решении уравнений (1)-(3) для каждого из случаев расчета аппаратов с интенсивной гидродинамикой учитываются особенности геометрии рабочего пространства устройства, характер ввода потоков в аппарат физико-химические свойства потоков, а также проводится анализ сил, действующих на частицы

дисперсной фазы в рабочем пространстве аппарата. При необходимости задаются законы изменения составляющих полной скорости сплошной фазы и давления в аппарате. Результаты расчёта – поля скоростей сплошной и дисперсной фазы в аппарате, поля давлений в аппарате, траектории и время пребывания частиц дисперсной фазы в рабочем пространстве аппарата.

Для моделирования гидродинамических процессов и расчёта аппаратов с вихревыми потоками на кафедре процессов и оборудования химических и нефтеперерабатывающих производств Сумского государственного университета разработана программа, которая позволяет получать графические и аналитические зависимости изменения составляющих полной скорости газового потока и дисперсных частиц в вихревом грануляторе по составленной математической модели [8,9].

Изначально происходит разбиение рабочего пространства аппарата сеткой на элементарные объёмы (рис.2). Затем программа просчитывает значение составляющих полной скорости начиная от нижнего сечения к верхнему. Получив значение на оси, происходит смещение координаты на единицу ближе к периферии, и так до тех пор, пока не достигается максимальное значение скорости радиуса на заданной высоте рабочего пространства. Далее происходит перемещение по оси на единицу вверх, и ведётся аналогичный расчёт. При достижении верхнего сечения, соответствующего полной (максимальной) высоте рабочего пространства, все рассчитанные значения вписываются в соответствующее диалоговое окно. Данные, полученные после расчёта, используются при построении графических зависимостей.

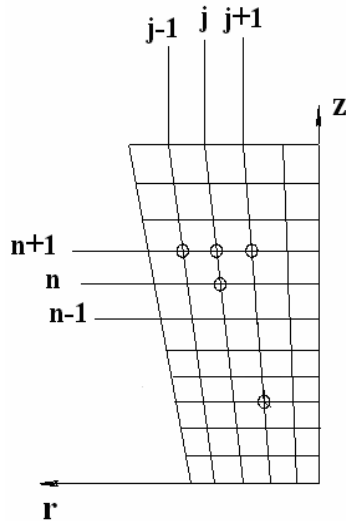


Рис. 2 - Общий вид расчётной сетки для определения составляющих полной скорости газового потока и дисперсной фазы в вихревом грануляторе.

Q (расход сплошной фазы)	0,6
ti (половина угла раскрытия конуса)	0,262
zmax (высота внутреннего конуса)	0,55
z1 (расстояние до уошенного конуса)	0,6
Vf1 (начальная закрутка сплошной фазы)	20
E (коэффициент турбулентной вязкости)	0,05
dz (количество делений сетки по высоте)	10
dr (количество делений сетки по радиусу)	10
Ro г (плотность сплошной фазы)	1,29
Mju г (вязкость сплошной фазы)	0,0002
Ro ч (плотность дисперсной фазы)	1450
d ч (диаметр дисперсной фазы)	0,003
Psi (коэф. аэродинамического сопротивл.)	0,44

Рис. 3 - Интерфейс программы.

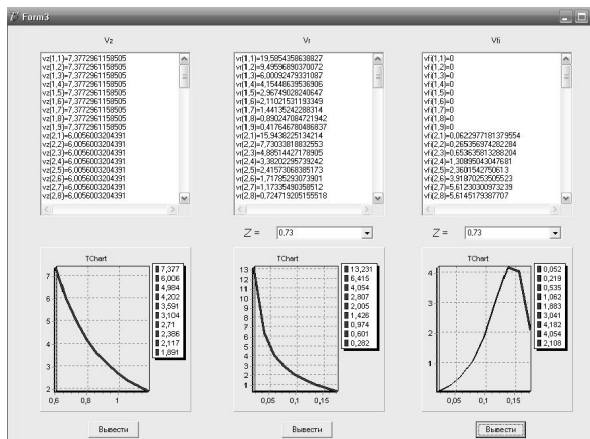


Рис. 4 - Диалоговое окно с результатами расчётов составляющих полной скорости газового потока.

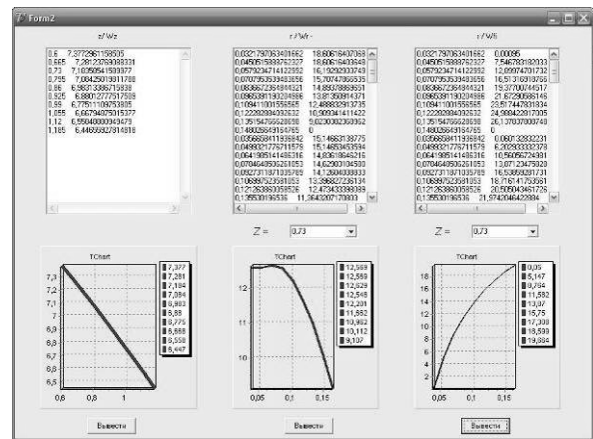


Рис. 5 - Диалоговое окно результатов расчётов составляющих полной скорости дисперсной фазы.

При открытии программы первичный интерфейс представляет собой диалоговое окно, предназначенное для ввода основных технологических и конструктивных параметров (рис. 3). Результаты расчёта представляются на отдельных панелях в виде числового ряда и графических зависимостей (рис. 4-5)

Поскольку результаты расчета представлены как в виде графических зависимостей, так и в табличном виде, то это позволяет проводить анализ работы вихревого аппарата, заключающийся в определении силового воздействия на дисперсную фазу со стороны газового потока. В этом случае возможно прогнозирование характера движения дисперсной фазы, а также выделения характерных областей повышенной и пониженной интенсивности движения потоков в осевом, радиальном и окружном направлении в рабочем объёме устройства с интенсивной гидродинамикой.

Одновременно, использование современных способов моделирования физических процессов, описание которых возможно в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных, наряду с использованием зарекомендовавших себя программных пакетов численного моделирования Fluent (<http://www.fluent.com/>), COSMOS FlowWorks (<http://www.cosmosm.com/>), FlowVision (<http://www.thesis.com.ru/>), Flow-3D (<http://www.flow3d.com/>), Ansys CFX (<http://www.ansys.com/>) и COMSOL Multiphysics (<http://www.comsol.com/>) для решения задач вычислительной гидродинамики позволяют спрогнозировать поведение сплошной и дисперсной фазы в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами с учётом особенностей моделируемого процесса и конструкции исследуемого аппарата. Указанные программные продукты представляют пользователям полный спектр инструментов для моделирования: построения или импорта геометрии модели (расчетной области), описания физического процесса, построения расчетной сетки – разбиения расчетной области (meshing), моделирования, а так же постобработки результатов расчета. Результаты компьютерного моделирования процессов сепарации в высокотурбулизированных аппаратах, представленные на рис.6, были проанализированы в публикациях [10-11]. Компьютерным моделированием гидродинамических процессов вихревых грануляционных устройств со сниженной высотой полёта гранул и переменным по высоте сечением рабочего пространства получены поля локальных скоростей в рабочем объёме грануляторов, представленные на рис.7.

Комплексный анализ результатов моделирования аналитическим и численным методами позволяет проводить тестирование модели на компьютере, а также даёт возможность проведения оптимизационного расчёта. Процесс моделирования помогает спрогнозировать возможные изменения и опробовать новые варианты, которые могут сделать процесс более эффективным.

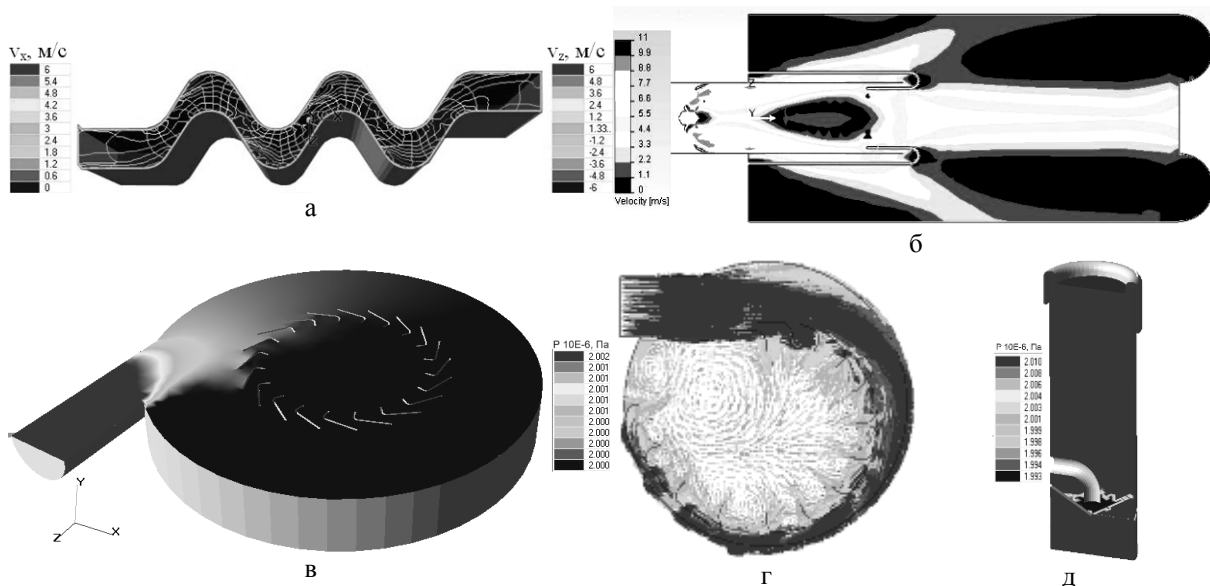


Рис. 6 – Результаты компьютерного моделирования гидродинамических процессов в контактных элементах сепарационных устройств:

а – изолинии составляющих локальных скоростей газового потока в криволинейном канале жалюзийного газосепаратора; б – заливка по значениям поля скоростей в центробежном каплеуловителе с эвольвентным завихрителем; в, г – заливка по значениям поля давлений и траектории движения капель в вихревой камере каплеуловителя с уголковыми сепарационными насадками; д – заливка по значению поля давлений в прямоточном массообменно-сепарационном элементе с лопастным завихрителем.

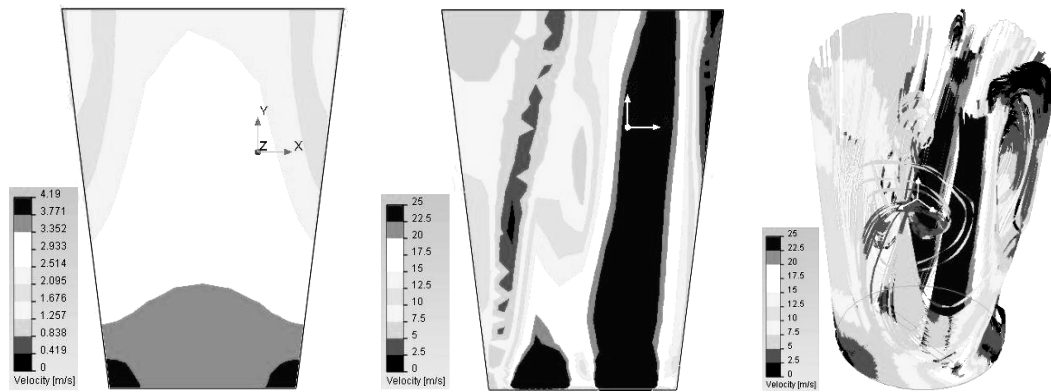


Рис. 7 – Результати комп'ютерного моделювання гідродинаміки вихревих потоків для грануляційних пристроїв со зниженою висотою польота гранул (залівка полей скоростей).

Результати расчёта гидродинамического режима работы аппаратов являются определяющим фактором для создания методики инженерного расчёта, выбора оптимальной конструкции рабочего пространства, типа устройств для создания высокотурбулизованных потоков, времени пребывания фаз в аппарате. Таким образом, представляется возможным проводить корректировку технологии проведения процесса в таких аппаратах на основании анализа гидродинамической обстановки в аппарате при изменении технологических (режимных) и конструктивных параметров осуществления процессов.

Литература

1. Артюхов А.Е. Высокоэффективные вихревые аппараты в малотоннажных производствах гранулированных продуктов / А.Е. Артюхов, В.И. Склабинский // Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии: сб. научных трудов XX Международной научно-технической конференции. – Минск, 2008. – С. 272–277.
2. Патент №82754 Україна, МПК (2006) B01J2/16. Спосіб гранулювання рідкого матеріалу та пристрій для його здійснення / А.Є. Артюхов, В.І. Склабінський; заявник та патентовласник Сумський державний університет – №а200608137; заявл. 20.07.2006; надрук 12.05.2008, Бюл. № 9.
3. Патент України. Заявка №а200812720 від 30.10.2008р., МПК (2006) B 01 J 2/16. Спосіб отримання гранул пористої структури та пристрій для його здійснення / Артюхов А.Є., Склабінський В.І., Жеба К.В.
4. Патент №88558 С2 Україна, МПК B01D45/04. Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку і пристрій для його здійснення / Склабінський В.І., Ляпощенко О.О., Логвин А.В., Міщенко О.С.; заявник та патентовласник Сумський державний університет — №200802372; заявлено 25.02.2008; надрук. 26.10.2009, Бюл. №20, 2009.
5. А.с. 1197707 СССР, МКИЗ В 01 D 53/18. Вихревой распыливающий массообменный аппарат. /Холин Б.Г., Склабинский В.И. - Б.И. № 46, 1985.
6. Патент України. Заявка № у 2009 11023 Україна, МПК(2009)B01D53/14. Спосіб очищення та осушування природного газу / О.О.Ляпощенко, Ю.О.Толстун, Я.М.Бакаєва. Заявлено 02.11.2009.
7. 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.
8. 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.
9. Склабинский В.И. Определение гидродинамических характеристик дисперсной фазы в малогабаритных вихревых аппаратах / В.И. Склабинский, А.Е. Артюхов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2009. – Вип. 6/2009 (59), частина 1. – С.196-201.
10. Склабінський В.І. Дослідження високоефективного інерційно-фільтруючого сепараційного обладнання компресорних установок нафтогазової промисловості / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко // Вісник Сумського державного університету. — 2006. — №10(94). — С. 112-119.
11. Логвин А.В. Визначення гідродинамічних показників інерційно-фільтруючих сепараторів за допомогою комп'ютерного моделювання та фізичного експерименту / Логвин А.В., Склабінський В.І., Ляпощенко О.О. // «Наукові дослідження – теорія та експеримент '2009»: Матеріали четвертої міжнародної науково-практичної конференції. Т.6. — Полтава: Вид-во «ІнтерГрафіка» 2009. - С.54-56.