

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПОТОКОВ В
ВИХРЕВОМ ГРАНУЛЯТОРЕ ВЗВЕШЕННОГО СЛОЯ**

Сумский государственный университет

Введение

В современной химической промышленности для проведения тепломассообменных процессов нашли применение различные типы устройств с многофазными системами и непосредственным контактом фаз. Гетерогенные процессы, протекающие в системе «газ-жидкость-твёрдое тело», занимают особое место среди других процессов, ведь скорость их протекания определяется закономерностями переноса массы и тепла между взаимодействующими фазами. К таким процессам относятся различные способы гранулирования [1].

Одним из наиболее эффективных методов осуществления тепломассообменных процессов при прямом контакте фаз является применение взвешенного или полувзвешенного слоя [2]. Основные преимущества такой гидродинамической системы отмечены в работах отечественных и зарубежных ученых [3-5]. Несмотря на многочисленные преимущества, аппараты с классическим взвешенным слоем характеризуются рядом недостатков: неравномерностью времени пребывания дисперсной фазы и низкой стабильностью слоя в широком диапазоне изменения нагрузок по жидкой, твердой и газовой фазам.

В таких устройствах интенсификация протекающих процессов за счёт простой турбулизации потоков существенно ограничена, поскольку она сопровождается повышением интенсивности физического воздействия на дисперсную фазу. Кроме того, увеличение рабочей скорости газовой фазы приводит не только к увеличению интенсивности работы взвешенного слоя, но

и к повышению энергетических затрат на функционирование такой системы. Следует отметить, что возрастание интенсивности работы взвешенного слоя не так интенсивно, как возрастание затрат энергии на взвешивание дисперсной фазы.

Внедрение новых форм организации взаимного движения потоков (при сохранении принципов контакта фаз во взвешенном состоянии), которые позволили бы интенсифицировать обработку дисперсных материалов без значительного увеличения затрат энергии, – перспективное направление развития тепломассообменных процессов в гетерогенных системах.

В настоящее время использование закрученных потоков получает всё большее распространение в тепломассообменных процессах [6–9]. Закрутка потоков позволяет существенно повысить интенсивность их протекания за счёт наличия градиентов скорости, интенсивного перемешивания и достаточно высокой степени турбулизации потоков.

Среди многообразия способов интенсификации процессов химической технологии закрутка потоков является одним из самых простых и распространенных способов. Это можно объяснить тем, что использование закрученных потоков приводит к улучшению эффективности тепломассообмена, а также выравниванию температурных неравномерностей и стабилизации течений. В грануляторах закрутка потока с помощью различных устройств (завихрителей) приводит к крупномасштабному воздействию на все характеристики поля течения, а следовательно, и тепломассообмен. Характерные для закрученных потоков трехмерность поля скорости и соизмеримость тангенциального и осевого компонентов скорости обуславливают формирование трехмерного поля давления с поперечным и продольным градиентами. Благодаря наличию поперечных составляющих полной скорости – тангенциальной и радиальной – усиливается конвективный перенос импульса, энергии и массы и изменяется вихревая структура внутренних закрученных потоков. С этим и связаны столь необходимые в технических приложениях свойства закрученных течений, выражающиеся в их

способности интенсифицировать процессы теплообмена, выравнять локальные температурные неоднородности за счет конвективного перемешивания [10].

Вихревые аппараты обладают большей удельной производительностью, меньшими габаритами [11]. В них также можно одновременно совмещать несколько процессов (например, гранулирование, сушку и охлаждение) [12].

Вихревой гранулятор взвешенного слоя (ВГВС) – новый тип грануляционного оборудования, в котором помимо, собственно, гранулирования параллельно проводятся процессы классификации и внутренней циркуляции мелких частиц (ретура) [13].

Для реализации механизмов управления траекторией движения и временем пребывания дисперсной фазы в ВГВС необходимо изучить гидродинамические характеристики движения однофазного и двухфазного закрученных потоков в его рабочем объеме. Использование компьютерного моделирования при исследовании гидродинамики вихревых потоков позволяет произвести подбор оптимальной конфигурации рабочего пространства и конструкции завихрителя для ВГВС. Результаты моделирования позволяют подобрать оптимальную конструкцию ВГВС на начальном этапе исследований до проведения эксперимента на натурном образце [14].

В работе [15] представлены результаты исследований гидродинамики вихревого потока, который образован различными завихрителями. Результаты этих не достаточно полно описывают механизмы распределения газового потока в вихревом аппарате (исследовано малое число завихрителей). Проблемы распределения газового потока в сепарационном пространстве вихревого аппарата и зоне отвода газового потока в данной работе не рассмотрены. Численное моделирование закрученных потоков в аппаратах с постоянной площадью сечения проведено в [16]. Авторы [17] рассмотрели особенности процесса гранулирования в конических аппаратах со взвешенным слоем, данные о гидродинамических характеристиках вихревого взвешенного слоя в этой работе отсутствуют. Работы [18–20] посвящены только основам

расчёта вихревых потоков в диффузорах, в них не рассматривается влияние завихрителя на характер движения газового потока.

В условиях значительного сокращения финансирования научных исследований и фондов развития производств экспериментальные работы по созданию новых технологий весьма затруднительны. В связи с этим задача развития и совершенствования численных методов исследования гидродинамики становится особенно актуальной.

1. Теоретические основы моделирования, общая методика проведения исследований

Для описания гидродинамических характеристик движения потоков в рабочем пространстве ВГВС могут быть применены аналитические и численные методы расчета [21].

Описание движения закрученного потока аналитическим методом основано на одном из нижеперечисленных подходов [22]:

1. Поток представляется в виде наложения плоского тока на потенциальное вращение. Методика расчета базируется на использовании эмпирических коэффициентов, она предусматривает только определение гидравлического сопротивления.

2. Применение уравнения Бернулли, наличие экстремума в функции одной из составляющих скорости закрученного потока при сохранении вдоль радиуса рабочей камеры момента количества движения. Недостаток подхода – грубая схематизация течения, отсутствие учета особенностей движения потоков в приосевой зоне рабочей камеры.

3. Использование уравнения Бернулли для описания движения жидкости в камере спирального типа. Этот метод требует предварительного определения характеристик, зависящих от геометрии рабочей камеры, он не позволяет определить все составляющие полной скорости.

Указанные недостатки приводят к значительному сужению области применения этих методов для описания и расчёта вихревых потоков.

Отдельно выделяют метод, в котором описание осесимметричного движения газового потока с вращением основывается на применении системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса (1) и уравнения неразрывности потока (2) [23]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V_i) + \frac{\partial}{\partial q_j}(\rho V_i V_j) = -\frac{\partial p}{\partial q_i} + \frac{\partial}{\partial q_j} \left[\mu \left(\frac{\partial V_i}{\partial q_j} + \frac{\partial V_j}{\partial q_i} \right) \right] + f_i, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial q_j}(\rho V_j) = 0, \quad (2)$$

где μ – коэффициент турбулентной вязкости; t – время; V_i – мгновенная составляющая (компонент) скорости по выбранной оси; ρ – плотность газа; p – давление; f_i – член, характеризующий действие массовых сил; q_j – координатные оси (для случая моделирования гидродинамики в рабочем объеме ВГВС целесообразно использовать криволинейную систему координат), $i, j = 1 \dots 3$; для цилиндрической системы координат (рис. 1) индекс «1» – осевое направление (z), индекс «2» – радиальное направление (r), индекс «3» – окружное направление (φ).

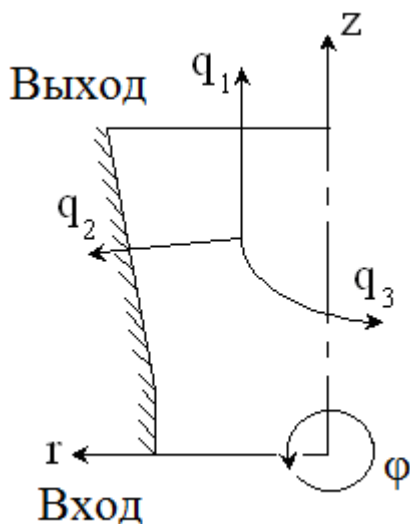


Рис. 1. Схема рабочего пространства ВГВС и система координат

Этот метод позволяет более полно провести определение гидродинамических характеристик движения потоков. Однако он наиболее применим для ламинарных течений.

В общем случае система уравнений Навье-Стокса и неразрывности потока носят нелинейный характер, они не имеют общего аналитического решения без введения определённых упрощений и допущений.

Непосредственное моделирование турбулентных течений путем количественного решения уравнений Навье-Стокса, записанных для мгновенных скоростей, на сегодня является нерешенной задачей. Однако для решения отдельных задач становится

возможным применение этого фундаментального уравнения гидродинамики при выполнении ряда условий:

- работа с усредненными по времени значениями скоростей при моделировании турбулентных течений;

- выбор системы координат, максимально удовлетворяющей конкретному случаю и облегчающей запись уравнений.

Для проведения моделирования решать указанные уравнения удобно численными методами (DEM - Discrete Element Method), определяя вместо непрерывного решения дискретный набор искомых значений в определенном месте (ячейке, узле сетки) пространства (при стационарном режиме движения потоков). Для достижения максимальной точности решения выбирается такой способ представления дискретных значений, который для этой дискретизации соответствует аналогам алгебраических уравнений. В результате математическую задачу решения системы дифференциальных или интегральных уравнений можно свести к задаче решения системы алгебраических уравнений.

На практике используются различные модели численного решения классических уравнений гидродинамики для турбулентных течений, которые с тем или иным успехом используются в различных случаях, имеют свои достоинства и недостатки [24]: Direct numerical simulation (DNS), Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS), Large Eddy Simulation (LES).

Учитывая, что на практике интерес представляют, как правило, не мгновенные, а осредненные по времени значения скоростей, для математического описания турбулентного движения закрученного газового потока используют уравнения Рейнольдса как модификацию уравнений Навье-Стокса (1):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{V}_i) + \frac{\partial}{\partial q_j}(\rho \overline{V}_i \overline{V}_j) + \frac{\partial}{\partial q_j}(\rho \overline{V}_i' \overline{V}_j) = -\frac{\partial p}{\partial q_i} + \frac{\partial}{\partial q_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \overline{V}_i}{\partial q_j} + \frac{\partial \overline{V}_j}{\partial q_i} \right) \right] + f_i, \quad (3)$$

где \bar{V} – усреднённые по времени значения скоростей; \bar{V}' – составляющие пульсаций скоростей.

Основное преимущество метода описания и решения задач гидродинамики, основанного на численном решении полных уравнений Рейнольдса, – точность и универсальность.

Для решения уравнений Рейнольдса (3) используется гипотеза Буссинеска [23]. В соответствии с этой гипотезой члены с пульсациями скорости ($\rho\bar{V}_i\bar{V}'_j$) в уравнении (3) связаны с усредненными характеристиками потока таким соотношением:

$$\rho\bar{V}_i\bar{V}'_j = -\mu \left(\frac{\partial \bar{V}_i}{\partial q_j} + \frac{\partial \bar{V}_j}{\partial q_i} \right) + \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k, \quad (4)$$

где $k = 0,5 \left(\overline{V'_j V'_j} \right)$ – кинетическая энергия турбулентности, $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$, $\delta_i = 0$ при $i \neq j$.

Система уравнений Рейнольдса является эллиптической. Она применяется для расчета течений в тех случаях, когда характеристики течения в произвольной точке области зависят от структуры течения как выше, так и ниже по потоку, то есть когда доминирующее направление движения жидкости является отсутствующим или слабо выраженным. Эллиптичность системы уравнений означает, что для ее решения необходимо задавать граничные условия по всем переменным на всех границах расчетной области.

В случае моделирования осесимметричных течений уравнения движения (3) и неразрывности потока (4) существенно упрощаются. Для криволинейной (цилиндрической) системы координат они выглядят следующим образом (при введении в уравнение (3) числа Рейнольдса $Re = V_0 D / \nu$, где характерные параметры D – гидравлический диаметр входного сечения расчетной области; V_0 – средняя расходная скорость во входном сечении; ν – кинематическая вязкость):

– уравнение Рейнольдса в проекции на осевое направление q_1 :

$$\begin{aligned}
& \frac{V_1}{H_1} \frac{\partial V_1}{\partial q_1} + \frac{V_2}{H_2} \frac{\partial V_1}{\partial q_2} - \frac{V_2^2}{H_1 H_2} \frac{\partial H_2}{\partial q_1} - \frac{V_3^2}{H_1 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_1} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial \left(\overline{V_1' V_2'} \right)}{\partial q_2} + \frac{\left(\overline{V_1' V_2'} \right)}{H_1^2 H_2 H_3} \frac{\partial (H_1^2 H_3)}{\partial q_2} + \\
& + \frac{1}{H_1} \frac{\partial \left(\overline{V_1' V_1'} \right)}{\partial q_1} + \frac{\left(\overline{V_1' V_1'} \right)}{H_1^2 H_2 H_3} \frac{\partial (H_1 H_2 H_3)}{\partial q_1} - \frac{\left(\overline{V_2' V_2'} \right)}{H_1 H_2} \frac{\partial H_2}{\partial q_1} - \frac{\left(\overline{V_3' V_3'} \right)}{H_1 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_1} = -\frac{1}{H_1} \frac{\partial p}{\partial q_1} + \\
& + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{H_1^2} \frac{\partial^2 V_1}{\partial q_1^2} + \frac{1}{H_2^2} \frac{\partial^2 V_1}{\partial q_2^2} + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_1}{\partial q_1} \frac{\partial (H_2 H_3 / H_1)}{\partial q_1} + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_1}{\partial q_2} \frac{\partial (H_1 H_3 / H_2)}{\partial q_2} + \right. \\
& \quad \left. - \frac{2}{H_1 H_2^2} \frac{\partial H_2}{\partial q_1} \frac{\partial V_2}{\partial q_2} + \frac{V_1}{H_1} \frac{\partial}{\partial q_1} \left(\frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial (H_2 H_3)}{\partial q_1} \right) + \right. \\
& \quad \left. + \frac{V_2}{H_1} \frac{\partial}{\partial q_1} \left(\frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial (H_1 H_3)}{\partial q_2} \right) - \frac{V_2}{H_2 H_3} \frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{H_3}{H_1 H_2} \frac{\partial H_2}{\partial q_1} \right) \right); \tag{5}
\end{aligned}$$

– уравнение Рейнольдса в проекции на радиальное направление q_2 :

$$\begin{aligned}
& \frac{V_1}{H_1} \frac{\partial V_2}{\partial q_1} + \frac{V_2}{H_2} \frac{\partial V_2}{\partial q_2} - \frac{V_1 V_2}{H_1 H_2} \frac{\partial H_2}{\partial q_1} - \frac{V_3^2}{H_2 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2} + \frac{1}{H_1} \frac{\partial \left(\overline{V_1' V_2'} \right)}{\partial q_1} + \frac{\left(\overline{V_1' V_2'} \right)}{H_1 H_2^2 H_3} \frac{\partial (H_2^2 H_3)}{\partial q_1} + \\
& + \frac{1}{H_2} \frac{\partial \left(\overline{V_2' V_2'} \right)}{\partial q_2} + \frac{\left(\overline{V_2' V_2'} \right)}{H_1 H_2^2 H_3} \frac{\partial (H_1 H_2 H_3)}{\partial q_2} - \frac{\left(\overline{V_3' V_3'} \right)}{H_2 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2} = -\frac{1}{H_2} \frac{\partial p}{\partial q_2} + \\
& + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{H_1^2} \frac{\partial^2 V_2}{\partial q_1^2} + \frac{1}{H_2^2} \frac{\partial^2 V_2}{\partial q_2^2} + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_2}{\partial q_1} \frac{\partial (H_2 H_3 / H_1)}{\partial q_1} + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_2}{\partial q_2} \frac{\partial (H_1 H_3 / H_2)}{\partial q_2} + \right. \\
& \quad \left. + \frac{2}{H_1 H_2^2} \frac{\partial H_2}{\partial q_1} \frac{\partial V_1}{\partial q_2} + \frac{V_2}{H_2} \frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial (H_1 H_3)}{\partial q_2} \right) \right); \tag{6}
\end{aligned}$$

– уравнение Рейнольдса в проекции на окружное направление q_3 :

$$\begin{aligned}
& \frac{V_1}{H_1} \frac{\partial V_3}{\partial q_1} + \frac{V_2}{H_2} \frac{\partial V_3}{\partial q_2} + \frac{V_1 V_3}{H_1 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_1} + \frac{V_2 V_3}{H_2 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial \left(\overline{V_2' V_3'} \right)}{\partial q_2} + \frac{\left(\overline{V_2' V_3'} \right)}{H_1 H_2 H_3^2} \frac{\partial (H_1 H_3^2)}{\partial q_2} + \\
& + \frac{1}{H_1} \frac{\partial \left(\overline{V_1' V_3'} \right)}{\partial q_1} + \frac{\left(\overline{V_1' V_3'} \right)}{H_1 H_2 H_3^2} \frac{\partial (H_2 H_3^2)}{\partial q_1} = \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{H_1^2} \frac{\partial^2 V_3}{\partial q_1^2} + \frac{1}{H_2^2} \frac{\partial^2 V_3}{\partial q_2^2} + \right. \tag{7}
\end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_3}{\partial q_1} \frac{\partial(H_2 H_3 / H_1)}{\partial q_1} + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_3}{\partial q_2} \frac{\partial(H_1 H_3 / H_2)}{\partial q_2} + \frac{V_3}{H_1 H_2} \frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{H_1}{H_2 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2} \right);$$

- уравнение неразрывности:

$$\frac{1}{H_1 H_2 H_3} \left(V_1 \frac{\partial(H_2 H_3)}{\partial q_1} + V_2 \frac{\partial(H_3 H_1)}{\partial q_2} \right) + \frac{1}{H_1} \frac{\partial V_1}{\partial q_1} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial V_2}{\partial q_2} = 0, \quad (8)$$

где H_1, H_2, H_3 – коэффициенты Ламе [25].

Дальнейшее упрощение системы уравнений (5-8) для моделирования вихревого потока газовой фазы в рабочем пространстве ВГВС возможно при использовании таких предположений [26]:

– предполагается наличие доминирующего направления течения, вдоль которого осевая составляющая скорости газового потока везде положительная и намного превышает радиальную;

– составляющая скорости движения газового потока в осевом направлении меняется значительно медленнее, чем в радиальном;

– величины скоростей и давления в каждом элементарном объеме газового потока зависят только от условий ниже по потоку и не зависят от условий выше по потоку.

Эти предположения позволяют провести анализ порядков составляющих в уравнениях (5)–(8) и отбросить те из них, которые не оказывают заметного влияния на результат расчета.

После учёта предположений для осесимметричного газового потока уравнения (5)–(8) запишутся в виде

$$\begin{aligned} \frac{V_1}{H_1} \frac{\partial V_1}{\partial q_1} + \frac{V_2}{H_2} \frac{\partial V_1}{\partial q_2} - \frac{V_3^2}{H_1 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_1} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial \left(\overline{V_1' V_2'} \right)}{\partial q_2} + \frac{\left(\overline{V_1' V_2'} \right)}{H_1^2 H_2 H_3} \frac{\partial (H_1^2 H_3)}{\partial q_2} = \\ = - \frac{1}{H_1} \frac{\partial p}{\partial q_1} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{H_2^2} \frac{\partial^2 V_1}{\partial q_2^2} + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_1}{\partial q_2} \frac{\partial (H_1 H_3 / H_2)}{\partial q_2} \right); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{\partial p_r}{\partial q_2} = \frac{V_3^2}{H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2}; \quad (10)$$

$$\frac{V_1}{H_1} \frac{\partial V_3}{\partial q_1} + \frac{V_2}{H_2} \frac{\partial V_3}{\partial q_2} + \frac{V_1 V_3}{H_1 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_1} + \frac{V_2 V_3}{H_2 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial(\overline{V_2' V_3'})}{\partial q_2} + \frac{(\overline{V_2' V_3'})}{H_1 H_2 H_3^2} \frac{\partial(H_1 H_3^2)}{\partial q_2} =$$

$$= \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{1}{H_2^2} \frac{\partial^2 V_3}{\partial q_2^2} + \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial V_3}{\partial q_2} \frac{\partial(H_1 H_3 / H_2)}{\partial q_2} + \frac{V_3}{H_1 H_2} \frac{\partial}{\partial q_2} \left(\frac{H_1}{H_2 H_3} \frac{\partial H_3}{\partial q_2} \right) \right); \quad (11)$$

$$\frac{1}{H_1 H_2 H_3} \left(V_1 \frac{\partial(H_2 H_3)}{\partial q_1} + V_2 \frac{\partial(H_3 H_1)}{\partial q_2} \right) + \frac{1}{H_1} \frac{\partial V_1}{\partial q_1} + \frac{1}{H_2} \frac{\partial V_2}{\partial q_2} = 0. \quad (12)$$

Эта система уравнений замыкается

уравнением постоянства расхода:

$$\int_0^{Q_2} V_1 H_2 H_3 dq_2 = \text{const}, \quad (13)$$

где Q_2 – координата q_2 на стенке рабочего объема ВГВС.

Полученная система уравнений (9) – (13) имеет параболический характер, и ее решение базируется на методе, предложенном Патанкармом и Сполдинггом [27] и реализованном в процедуре SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) и его модификациях.

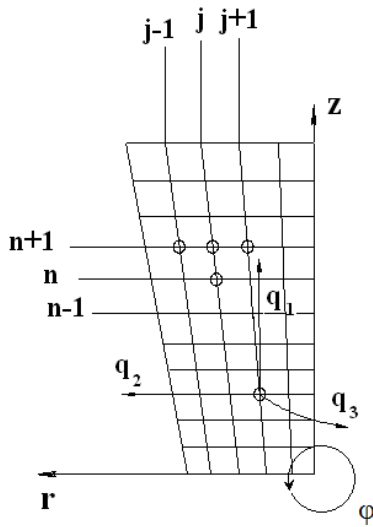


Рис. 2. Построение расчётной сетки

Численное решение уравнений математической модели выполняется за один маршевый проход от входного сечения рабочего объема к выходному с использованием метода конечных объемов с элементами конечно-элементного подхода. Перед выполнением расчета строится расчетная сетка (рис. 2), и неизвестные значения скоростей и давления отыскиваются в узлах этой сетки.

Моделирование движения гранул в рабочем пространстве ВГВС проводилось на основании системы дифференциальных уравнений движения частицы [28]:

$$\left. \begin{aligned} m \frac{d^2 q_1}{dt^2} &= -g + \psi \cdot \frac{\pi \cdot \mu_z \cdot d}{8 \cdot m} (V_1 - W_1), \\ m \frac{d^2 q_2}{dt^2} &= \frac{W_3^2}{r} + \psi \cdot \frac{\pi \cdot \mu_z \cdot d}{8 \cdot m} (V_2 - W_2), \\ m \frac{d^2 q_3}{dt^2} &= -\frac{W_2 W_3}{r} + \psi \cdot \frac{\pi \cdot \mu_z \cdot d}{8 \cdot m} (V_3 - W_3) \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

где m – масса гранулы; r – текущий радиус рабочего пространства вихревого гранулятора; W_1, W_2, W_3 – радиальная, окружная и расходная составляющие скорости движения гранулы соответственно; g – ускорение свободного падения; ψ – линейный коэффициент сопротивления гранулы газовому потоку; μ_z – вязкость газового потока; d – диаметр гранулы.

2. Результаты моделирования

Для компьютерного моделирования гидродинамики потоков и визуализации результатов исследований в данной работе использованы комплексы COSMOSFloWorks (www.solidworks.com) и Flow Vision (www.flowvision.ru).

2.1 Влияние конструкции завихрителя и конфигурации рабочего объёма на гидродинамические характеристики газового потока [29–31]

Результаты компьютерного моделирования гидродинамики однофазного потока (профиль скоростей) в рабочем пространстве ВГВС в зависимости от конструктивного исполнения разгонного элемента представлены на рис. 3–5.

Поле скорости для перфорированного газораспределительного устройства (рис. 3) размещено по сечению рабочего пространства ВГВС достаточно симметрично (это объясняется тем, что газораспределительное устройство имеет полностью перфорированное полотно), но неравномерно и с резкими пиками вдоль радиуса вихревого гранулятора.

Поле скорости для газораспределительного устройства с разгонными элементами (рис. 4) имеет несимметричный характер в рабочем пространстве

ВГВС, наблюдаются пики непостоянного характера и места размещения. Значение скорости колеблется в широком диапазоне. Это объясняется тем, что две лопатки, которые имеют в своей конструкции газораспределительное устройство, не позволяют создать интенсивное вихревое движение газового потока, ведь энергия закрученного потока, поступающего к рабочему пространству вихревого гранулятора, угасает в результате взаимодействия с восходящим потоком газа, поступающим через перфорированную часть газораспределительного устройства. Таким образом, движение газового потока приобретает нестационарный характер со спонтанным возникновением вихрей в центре рабочего пространства при их несимметричности и с зонами снижения скорости движения по мере приближения к твердой стенке.

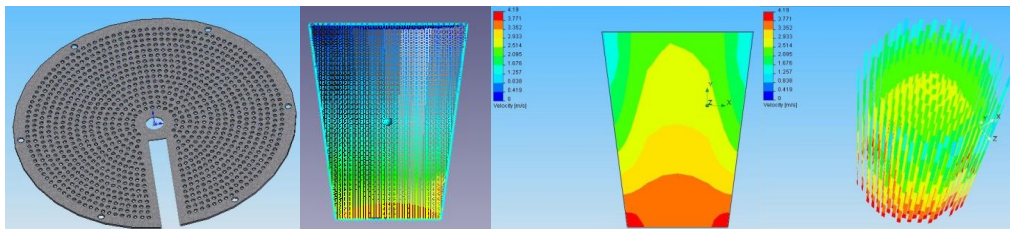


Рис. 3. Заливка поля скоростей газового потока для перфорированного газораспределительного устройства

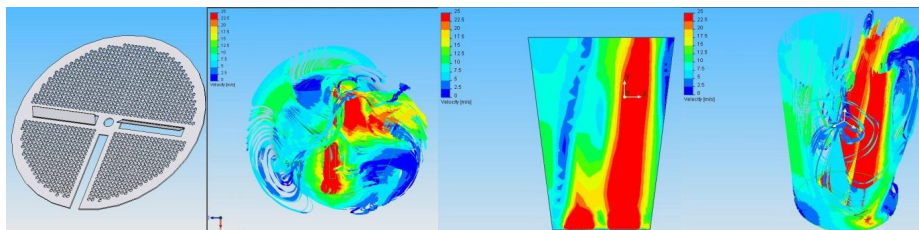


Рис. 4. Заливка поля скоростей газового потока для перфорированного газораспределительного устройства с разгонными элементами

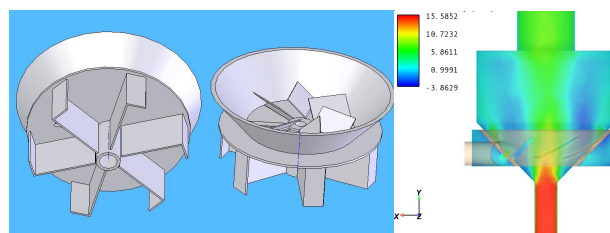


Рис. 5. Заливка поля скоростей газового потока для перфорированного газораспределительного устройства с двумя зонами создания вихревого потока

Для газораспределительного устройства с двумя зонами создания вихревого потока (рис. 5) определены характерные зоны ярко выраженного вихревого тока и обратного вихревого движения, которое наблюдается при выходе гранулятора на рабочий режим.

Компьютерное моделирование проводилось также для изучения гидродинамики газового потока в рабочем объеме ВГВС различной конфигурации (рис. 6) при установке газораспределителей различных типов (рис. 7) с разным углом наклона лопаток α и их числом n .

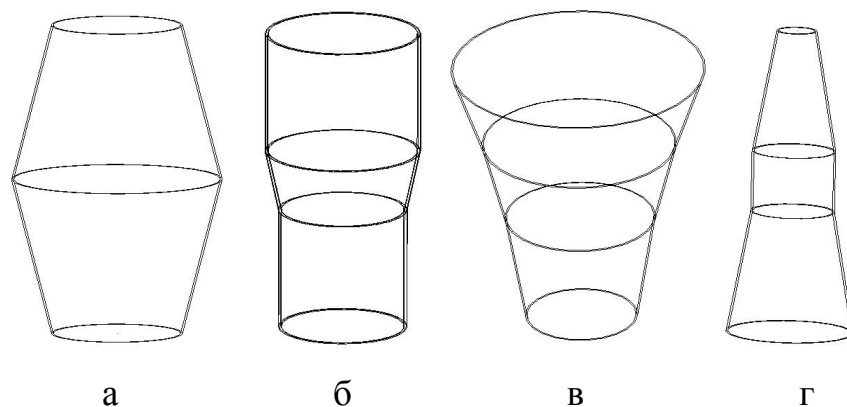


Рис. 6. Рабочие объемы: а – рабочий объем № 1; б – рабочий объем № 2; в – рабочий объем № 3; г – рабочий объем № 4

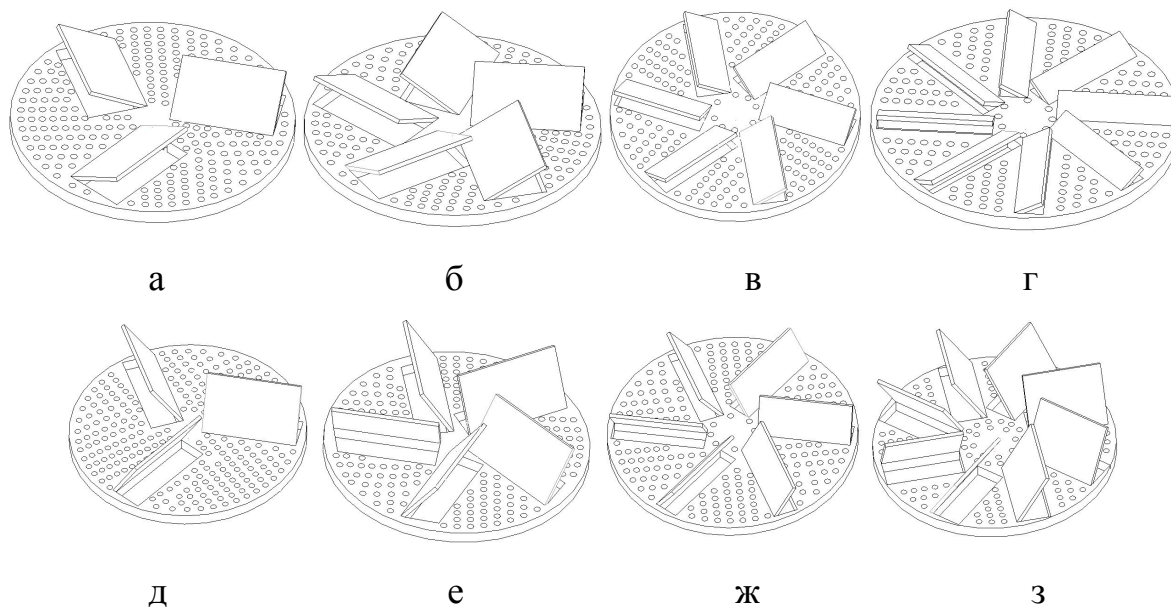


Рис. 7. Газораспределительные устройства: а – $\alpha=30^\circ$, $n=3$; б – $\alpha=30^\circ$, $n=5$; в – $\alpha=30^\circ$, $n=6$; г – $\alpha=30^\circ$, $n=8$; д – $\alpha=60^\circ$, $n=3$; е – $\alpha=60^\circ$, $n=5$; ж – $\alpha=60^\circ$, $n=6$; з – $\alpha=60^\circ$, $n=8$

На рис. 8 и 9 представлена визуализация движения потоков при конфигурации рабочего пространства № 1.

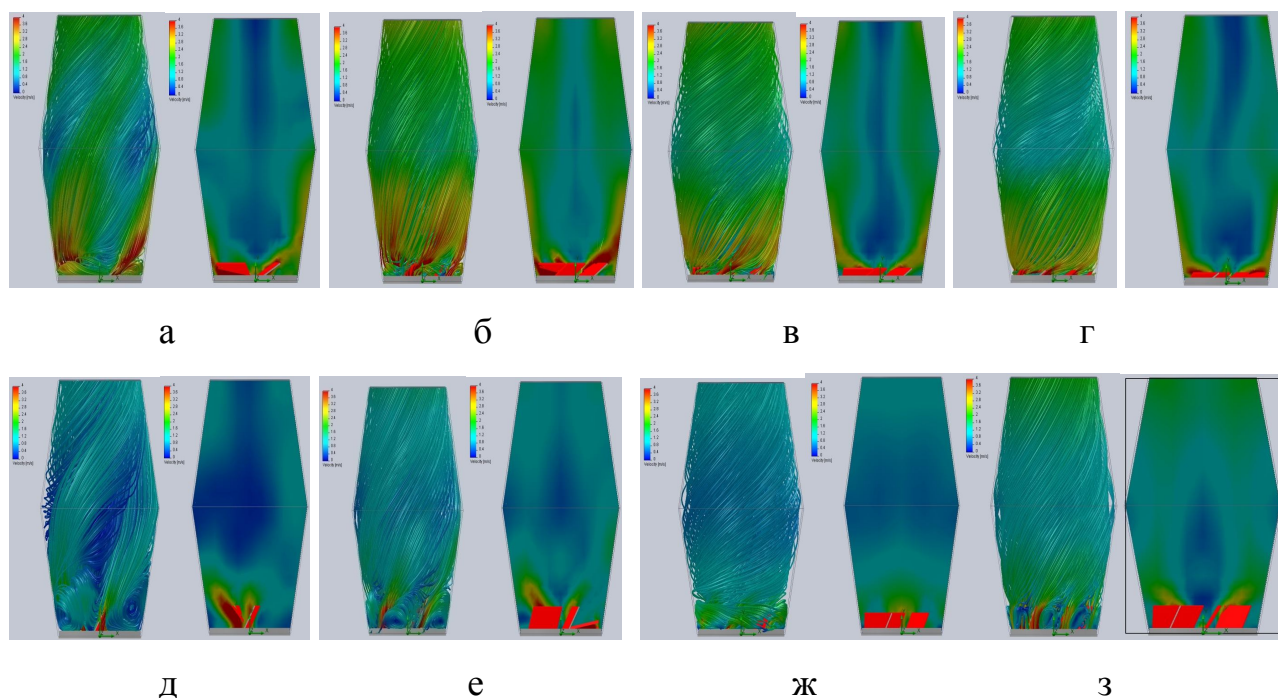


Рис. 8. Заливка поля скоростей газового потока при конфигурации рабочего пространства № 1 и газораспределительном устройстве без перфорации: а – $\alpha=30^\circ$, $n=3$; б – $\alpha=30^\circ$, $n=5$; в – $\alpha=30^\circ$, $n=6$; г – $\alpha=30^\circ$, $n=8$; д – $\alpha=60^\circ$, $n=3$; е – $\alpha=60^\circ$, $n=5$; ж – $\alpha=60^\circ$, $n=6$; з – $\alpha=60^\circ$, $n=8$

При установке газораспределительного устройства с 3 лопатками наблюдается увеличение скорости газового потока у самих лопаток, которая сразу же снижается при прохождении по рабочему объему. В центре рабочего объема возникают застойные зоны. При установке газораспределительного устройства с 5 лопатками наблюдается равномерное распределение скоростей по всему рабочему объему вихревого аппарата с незначительным образованием застойных зон в центре. При увеличении угла наклона лопаток (60°) скорость в рабочем объеме № 1 значительно снижается, у лопаток образуются локальные завихрения. В центре наблюдается образование зон понижения скорости. При перфорации газораспределительного устройства (рис. 10) скорости незначительно выравниваются по объему.

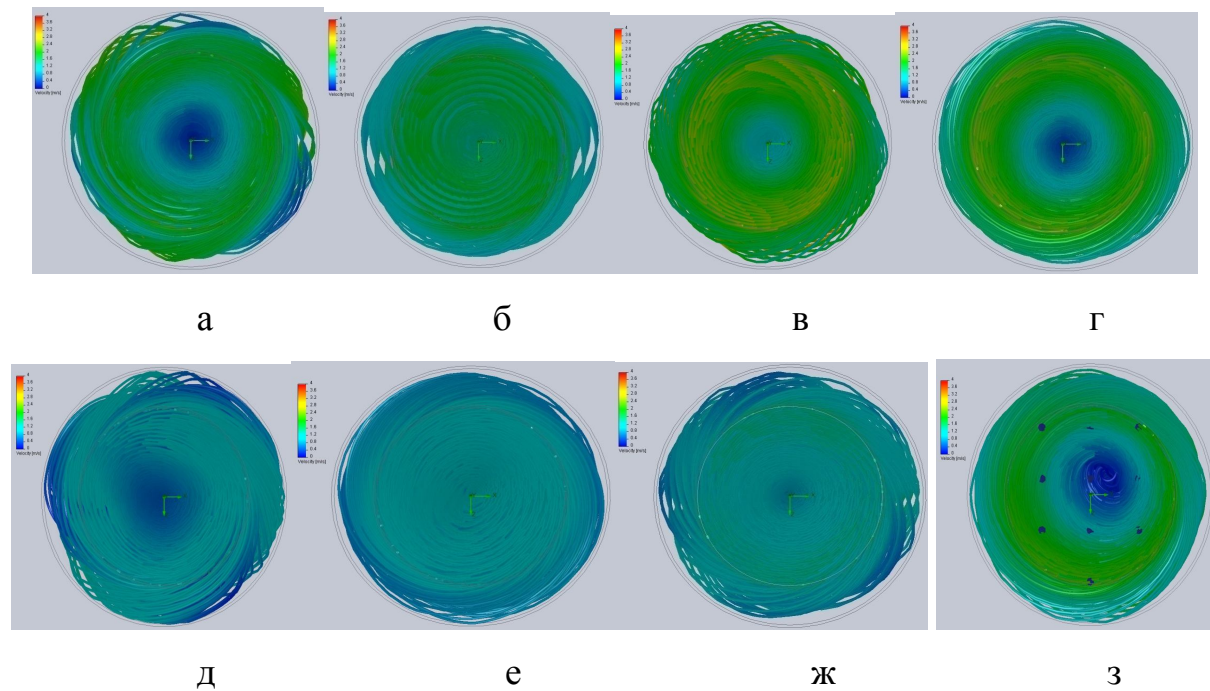


Рис. 9. Заливка поля скоростей газового потока при конфигурации рабочего пространства № 1 и газораспределительном устройстве без перфорации (вид сверху): а – $\alpha=30^\circ$, $n=3$; б – $\alpha=30^\circ$, $n=5$; в – $\alpha=30^\circ$, $n = 6$; г – $\alpha=30^\circ$, $n = 8$; д – $\alpha =60^\circ$, $n =3$; е – $\alpha=60^\circ$, $n=5$; ж – $\alpha=60^\circ$, $n=6$; з – $\alpha=60^\circ$, $n=8$

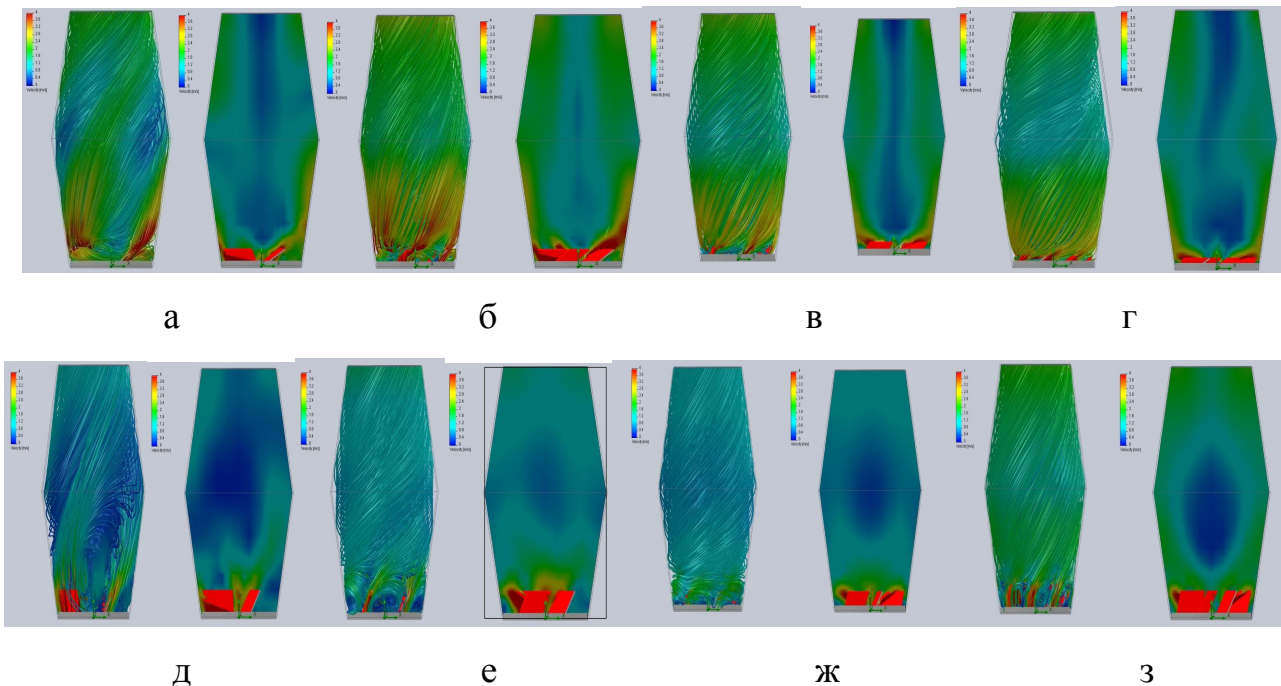
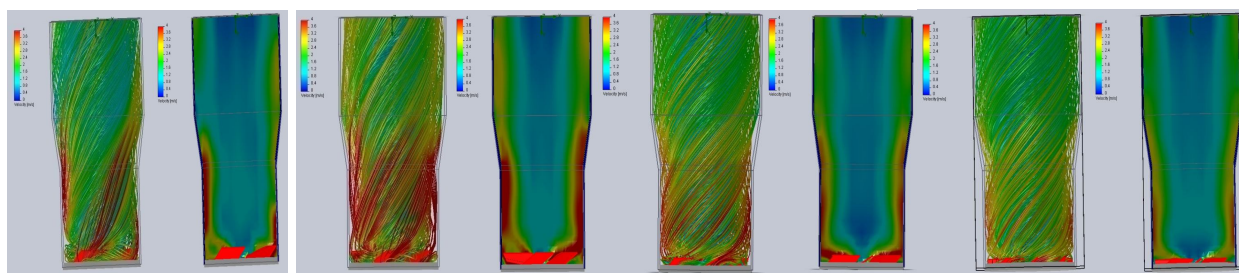


Рис. 10. Заливка поля скоростей газового потока при конфигурации рабочего пространства № 1 и газораспределительном устройстве с перфорацией: а – $\alpha=30^\circ$, $n=3$; б – $\alpha=30^\circ$, $n=5$; в – $\alpha=30^\circ$, $n = 6$; г – $\alpha=30^\circ$, $n = 8$; д – $\alpha =60^\circ$, $n =3$; е – $\alpha=60^\circ$, $n=5$; ж – $\alpha=60^\circ$, $n=6$; з – $\alpha=60^\circ$, $n=8$

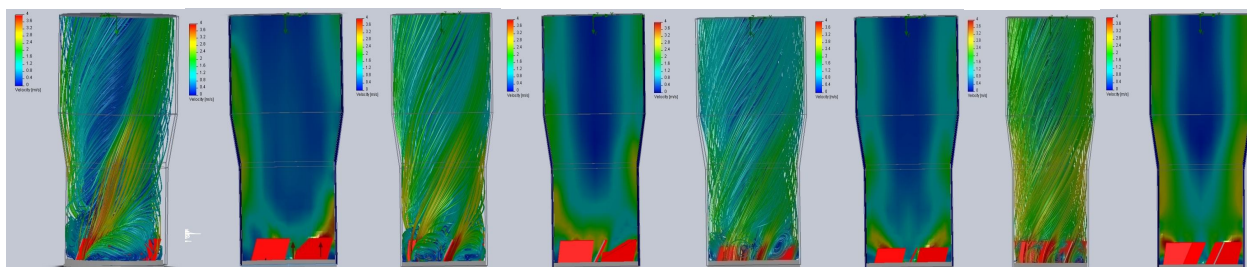


а

б

в

Г



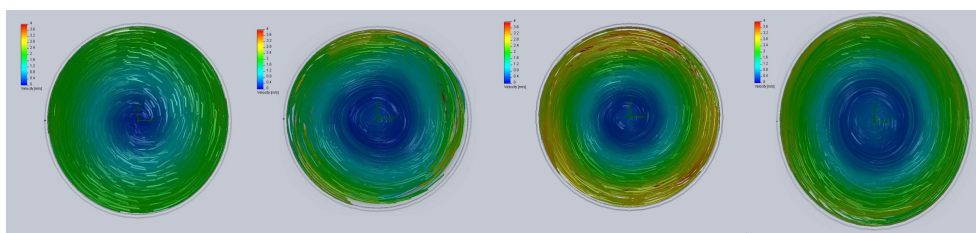
д

е

ж

з

Рис.11. Заливка поля скоростей газового потока при конфигурации рабочего пространства № 2 и газораспределительном устройстве без перфорации: а – $\alpha=30^\circ$, $n=3$; б – $\alpha=30^\circ$, $n=5$; в – $\alpha=30^\circ$, $n = 6$; Г – $\alpha=30^\circ$, $n = 8$; д – $\alpha =60^\circ$, $n =3$; е – $\alpha=60^\circ$, $n=5$; ж – $\alpha=60^\circ$, $n=6$; з – $\alpha=60^\circ$, $n=8$

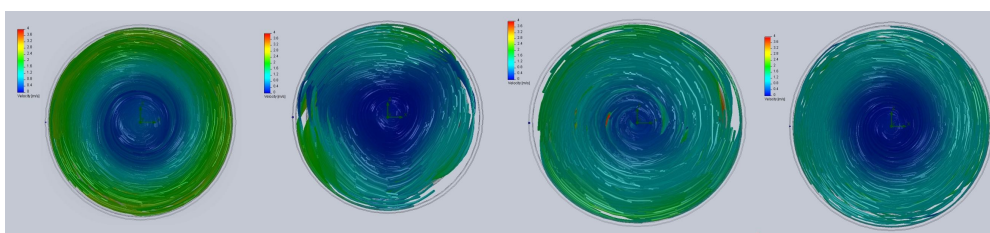


а

б

в

Г



д

е

ж

з

Рис. 12. Заливка поля скоростей газового потока при конфигурации рабочего пространства № 2 и газораспределительном устройстве без перфорации (вид сверху): а – $\alpha=30^\circ$, $n=3$; б – $\alpha=30^\circ$, $n=5$; в – $\alpha=30^\circ$, $n = 6$; Г – $\alpha=30^\circ$, $n = 8$; д – $\alpha =60^\circ$, $n =3$; е – $\alpha=60^\circ$, $n=5$; ж – $\alpha=60^\circ$, $n=6$; з – $\alpha=60^\circ$, $n=8$

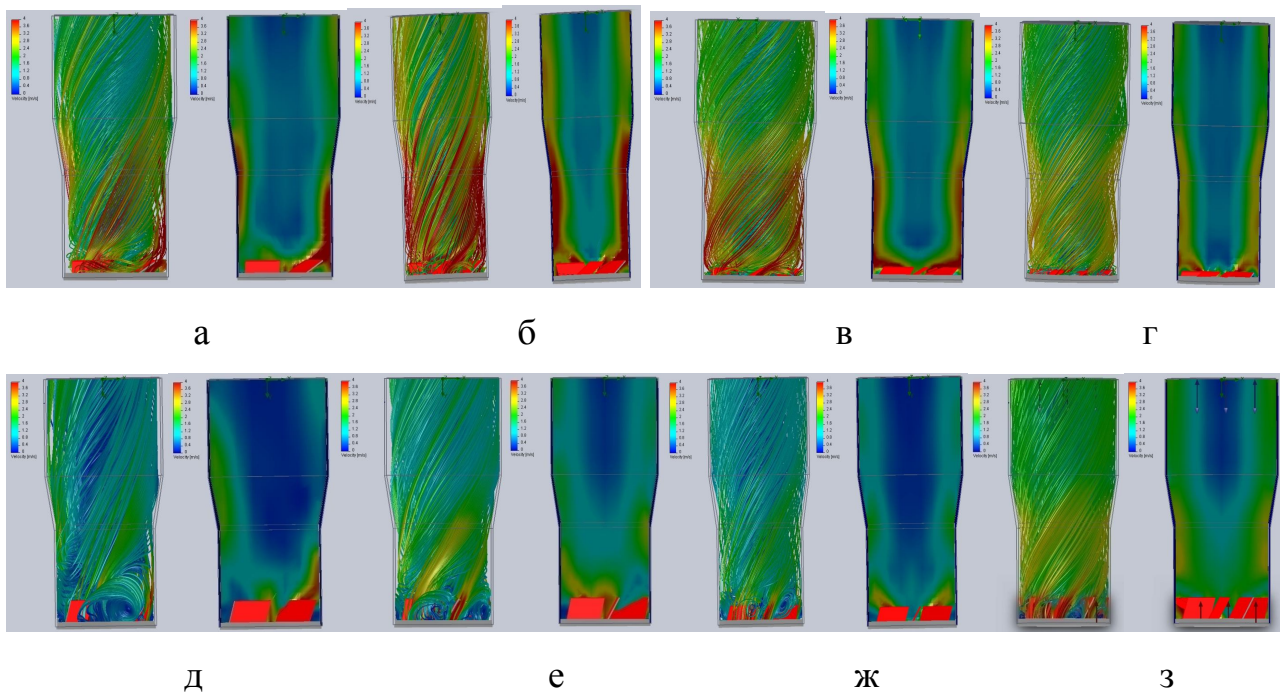


Рис. 13. Заливка поля скоростей газового потока при конфигурации рабочего пространства № 2 и газораспределительном устройстве с перфорацией: а – $\alpha=30^\circ$, $n=3$; б – $\alpha=30^\circ$, $n=5$; в – $\alpha=30^\circ$, $n=6$; г – $\alpha=30^\circ$, $n=8$; д – $\alpha=60^\circ$, $n=3$; е – $\alpha=60^\circ$, $n=5$; ж – $\alpha=60^\circ$, $n=6$; з – $\alpha=60^\circ$, $n=8$

На рис. 11–13 представлена визуализация движения потоков при конфигурации рабочего пространства № 2. При установке газораспределительного устройства наблюдается увеличение скорости газового потока у стенок, а в середине аппарата возникают зоны пониженных скоростей. Увеличение угла наклона лопаток сопровождается увеличением застойных зон.

На рис. 14–16 представлена визуализация движения потоков при конфигурации рабочего пространства № 3. При установке газораспределительного устройства без перфорации наблюдается неравномерное распределение составляющих скорости. Как видно из рис. 15, возникает хаотическое завихрение газового потока. Застойные зоны увеличиваются по мере увеличения угла раскрытия рабочего пространства. Перфорация газораспределительного устройства не влияет на скорость газового потока.

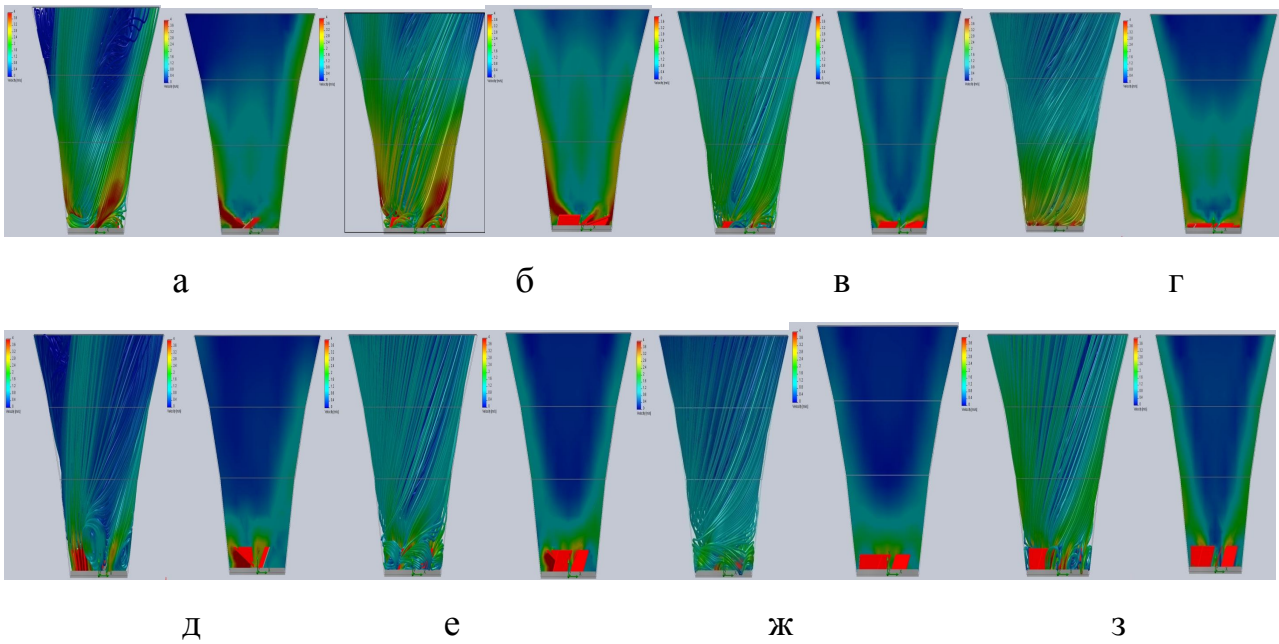


Рис. 14. Заливка поля скоростей газового потока при конфигурации рабочего пространства № 3 и газораспределительном устройстве без перфорации: а – $\alpha=30^\circ$, $n=3$; б – $\alpha=30^\circ$, $n=5$; в – $\alpha=30^\circ$, $n=6$; г – $\alpha=30^\circ$, $n=8$; д – $\alpha=60^\circ$, $n=3$; е – $\alpha=60^\circ$, $n=5$; ж – $\alpha=60^\circ$, $n=6$; з – $\alpha=60^\circ$, $n=8$

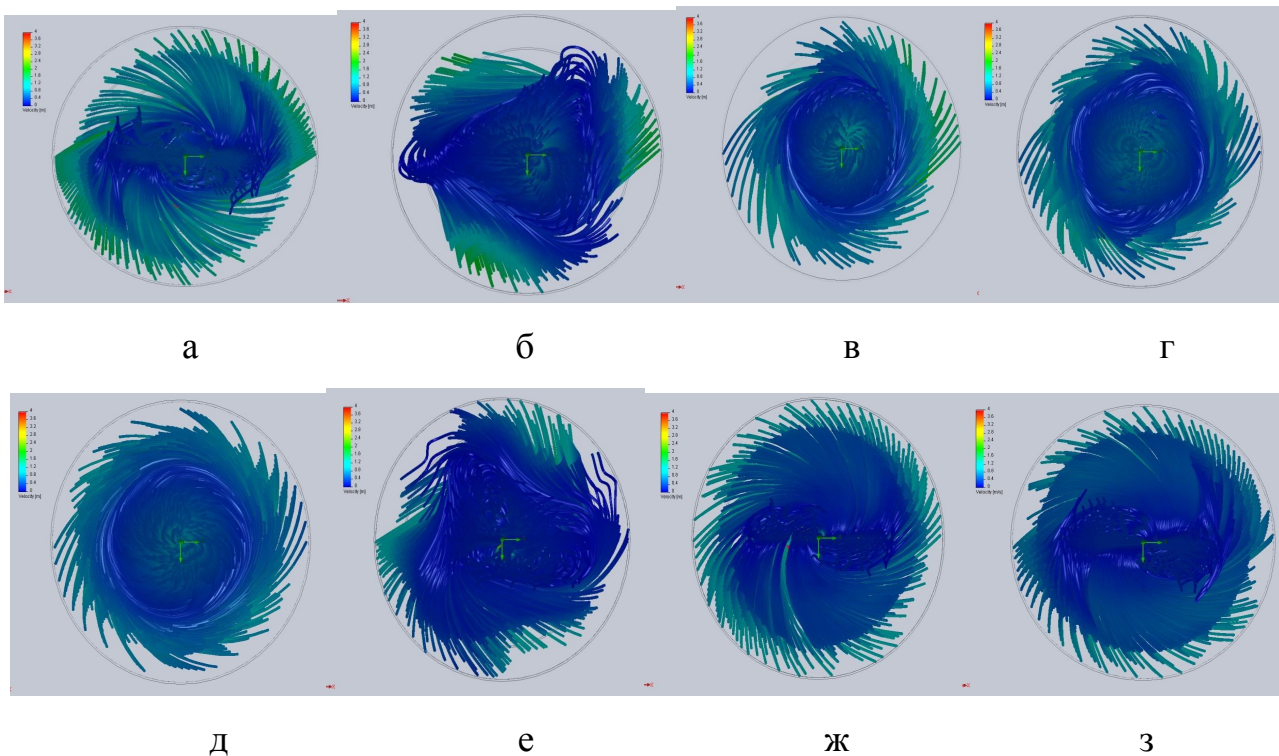
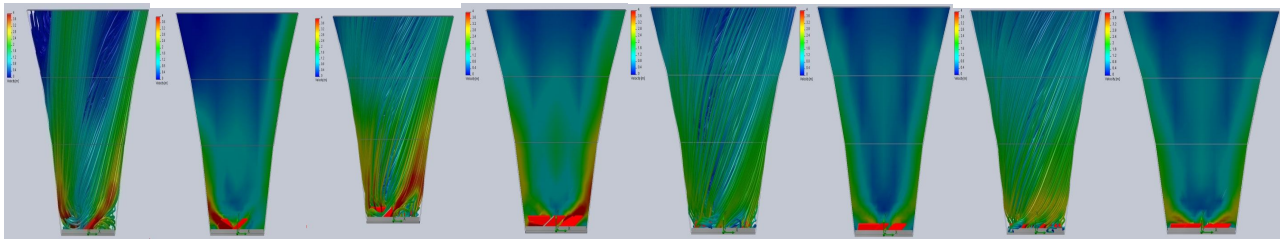


Рис. 15. Заливка поля скоростей газового потока при конфигурации рабочего пространства № 3 и газораспределительном устройстве без перфорации (вид сверху): а – $\alpha=30^\circ$, $n=3$; б – $\alpha=30^\circ$, $n=5$; в – $\alpha=30^\circ$, $n=6$; г – $\alpha=30^\circ$, $n=8$; д – $\alpha=60^\circ$, $n=3$; е – $\alpha=60^\circ$, $n=5$; ж – $\alpha=60^\circ$, $n=6$; з – $\alpha=60^\circ$, $n=8$

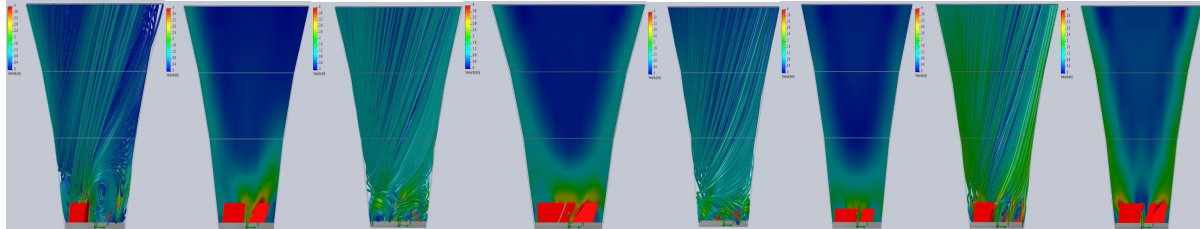


а

б

в

г



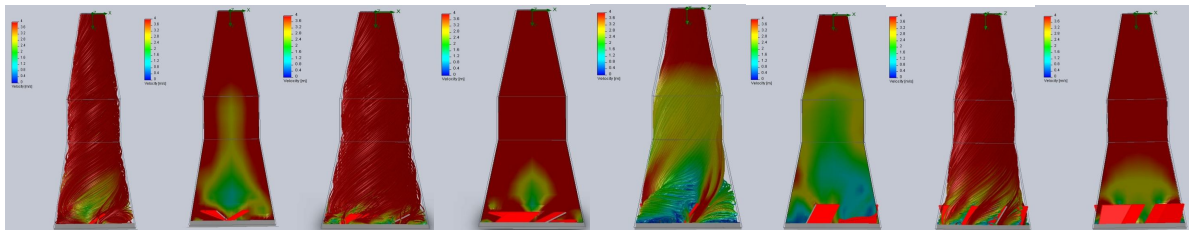
д

е

ж

з

Рис. 16. Заливка поля скоростей газового потока при конфигурации рабочего пространства № 3 и газораспределительном устройстве с перфорацией: а – $\alpha=30^\circ$, $n=3$; б – $\alpha=30^\circ$, $n=5$; в – $\alpha=30^\circ$, $n=6$; г – $\alpha=30^\circ$, $n=8$; д – $\alpha=60^\circ$, $n=3$; е – $\alpha=60^\circ$, $n=5$; ж – $\alpha=60^\circ$, $n=6$; з – $\alpha=60^\circ$, $n=8$



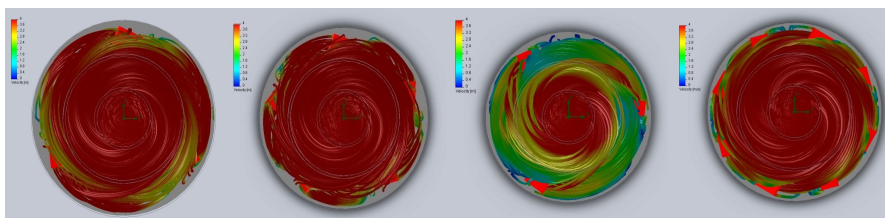
а

б

в

г

Рис. 17. Заливка поля скоростей газового потока при конфигурации рабочего пространства № 4 и газораспределительном устройстве без перфорации: а – $\alpha=30^\circ$, $n=3$; б – $\alpha=30^\circ$, $n=5$; в – $\alpha=60^\circ$, $n=3$; г – $\alpha=60^\circ$, $n=8$



а

б

в

г

Рис. 18. Заливка поля скоростей газового потока при конфигурации рабочего пространства № 4 и газораспределительном устройстве без перфорации (вид сверху): а – $\alpha=30^\circ$, $n=3$; б – $\alpha=30^\circ$, $n=5$; в – $\alpha=60^\circ$, $n=3$; г – $\alpha=60^\circ$, $n=8$

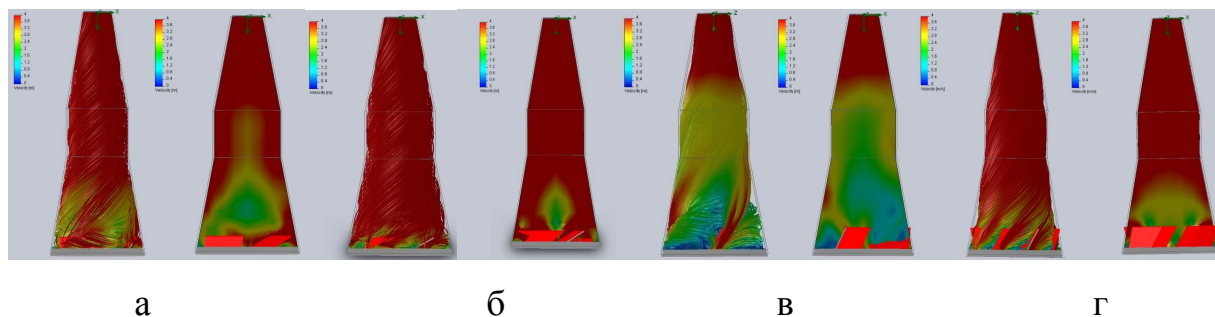


Рис. 19. Заливка поля скоростей газового потока при конфигурации рабочего пространства № 4 и газораспределительном устройстве с перфорацией: а – $\alpha=30^\circ$, $n=3$; б – $\alpha=30^\circ$, $n=5$; в – $\alpha=60^\circ$, $n=3$; г – $\alpha=60^\circ$, $n=8$

На рис. 17–19 представлена визуализация движения потоков при конфигурации рабочего пространства № 4. При установке газораспределительного устройства с разным количеством лопаток наблюдается неравномерное распределение составляющих скорости. Также наблюдается значительное увеличение скорости газового потока по мере его прохождения рабочим объёмом за счёт уменьшения сечения.

При установке на определенной высоте эжектора скорость газового потока немного выравнивается (рис. 20).

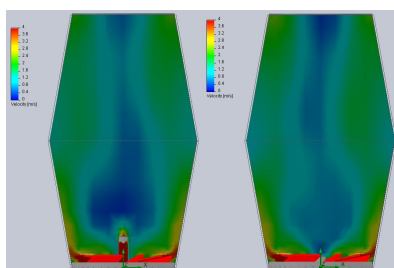


Рис. 20. Заливка поля скоростей газового потока при установке инжектора

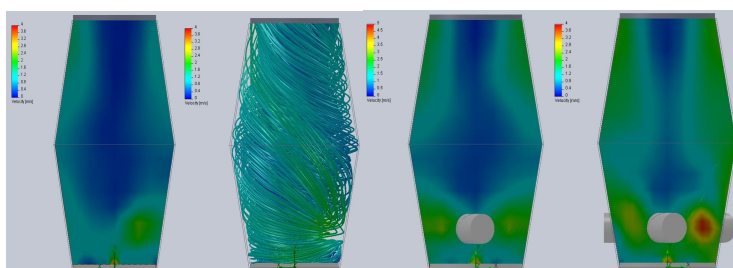


Рис. 21. Заливка поля скоростей газового потока при его тангенциальном вводе в рабочее пространство: а – с одним патрубком ввода; б – с двумя патрубками ввода; в – с тремя патрубками ввода

При тангенциальном вводе газового потока (рис. 21) в аппарате образовывается осесимметричное движение. В центре создаётся зона

пониженных скоростей, конфигурация которой зависит от количества патрубков ввода газового потока.

2.2 Исследование гидродинамики газового потока за пределами рабочего пространства ВГВС [32]

Расчётная модель для изучения гидродинамики газового потока за пределами рабочего пространства ВГВС представлена на рис. 22. Применение распределителей газа разной конструкции (рис. 23) приводит к созданию различных характерных зон в рабочем пространстве гранулятора. Результаты компьютерного моделирования для различных конструкций распределителя газа представлены на рис. 24. Расчёт проведён при условии отвода газового потока из гранулятора через смещённый патрубок.

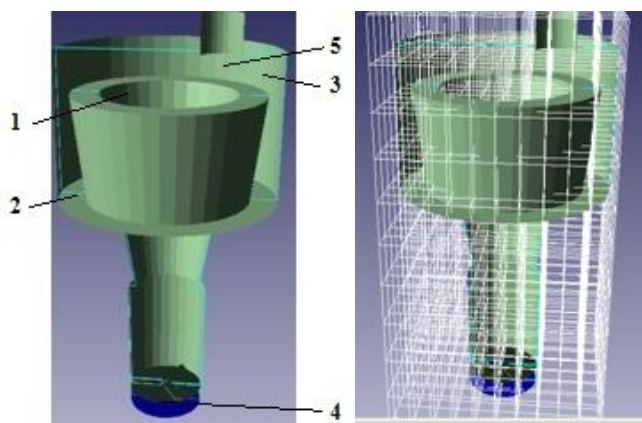


Рис. 22. Расчётная модель ВГВС: 1 – рабочее пространство; 2 – зона отвода мелких гранул; 3 – сепарационная зона; 4 – зона стабилизации движения газового потока; 5 – зона выхода газового потока из гранулятора

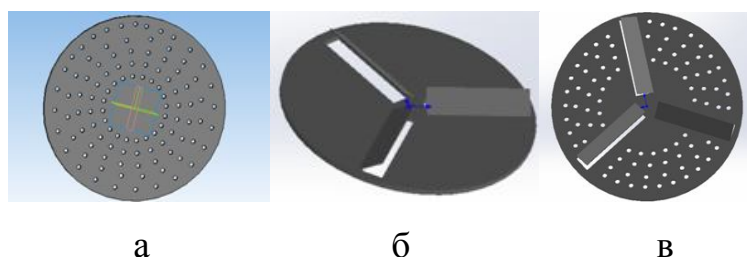
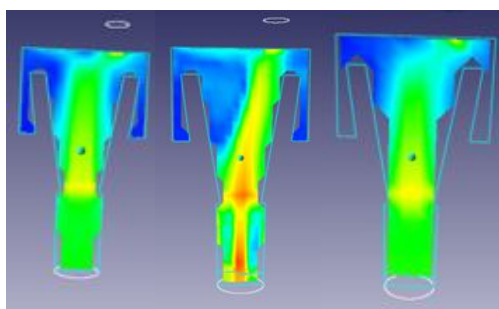
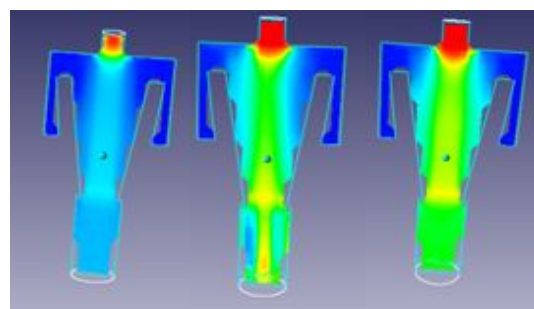


Рис. 23. Конструкции распределителей: а – перфорированный; б – с лопаточными завихрителями; в – перфорированный с лопаточными завихрителями



а б в

Рис. 24. Заливка поля скоростей газового потока в рабочем пространстве ВГВС при различной конструкции распределителя газа (отвод газа из смещённого патрубка): а – перфорированный; б – с лопаточными завихрителями; в – перфорированный с лопаточными завихрителями



а б в

Рис. 25. Заливка поля скоростей газового потока в рабочем пространстве ВГВС при различной конструкции распределителя газа (отвод газа по центру аппарата): а – перфорированный; б – с лопаточными завихрителями; в – перфорированный с лопаточными завихрителями

Перфорированный распределитель газа (рис. 24 а):

- равномерное распределение газового потока в нижней части гранулятора без его закрутки;
- застойные зоны в верхней части рабочего пространства гранулятора;
- низкая интенсивность движения газового потока в серационной зоне и зоне отвода мелких гранул.

Распределитель газа с лопаточными завихрителями (рис. 24 б):

- интенсивная закрутка газового потока в нижней части гранулятора;
- интенсивное вихревое движение газа по высоте гранулятора;
- высокая интенсивность движения газового потока в серационной зоне и зоне отвода мелких гранул.

Перфорированный распределитель газа с лопаточными завихрителями (рис. 24 в):

- равномерное распределение газового потока по центру гранулятора;
- низкая интенсивность закрутки газового потока;

- наличие застойных зон возле стенок аппарата;
- низкая интенсивность движения газового потока в сепарационной зоне и зоне отвода мелких гранул.

Из представленных конструкций распределителей газа оптимальным является распределитель с лопаточными завихрителями. Он обеспечивает необходимое распределение скорости вихревого газового потока в рабочем пространстве гранулятора. Установка распределителя газа такого типа способствует проведению процессов классификации гранул в аппарате.

Анализ рис. 24 показывает, что патрубок выхода газового потока следует устанавливать непосредственно на оси вихревого гранулятора. Установка патрубка выхода газового потока смещённым относительно оси аппарата целесообразна в случае центрального расположения распылителя. Равномерное распределение газового потока (при таком размещении патрубка отвода газа) может быть достигнуто при установке нескольких смещённых патрубков (например, трёх с шагом 120° по окружности крышки).

Распределение скорости газового потока в грануляторе с центральным отводом газа показано на рис. 25.

Особенности движения газового потока при установке патрубка отвода газа по центру аппарата:

- направленный отвод теплоносителя;
- равномерное распределение газового потока в сепарационной области гранулятора и области отвода мелких гранул.

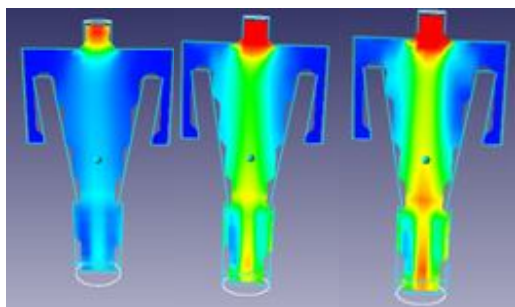
Анализ рис. 24 и 25 позволяет утверждать, что применение лопаточного распределителя газа позволит наиболее эффективно осуществить классификацию гранул по размерам и сепарацию мелких гранул.

Гидродинамические условия движения гранул в рабочем пространстве вихревого гранулятора зависят от начальной скорости газового потока. Гранулы различного диаметра при одной и той же скорости газового потока могут оставаться неподвижными, быть во взвешенном состоянии или уноситься из аппарата. Поэтому важно установить закон распределения эпюр скоростей в

вихревом грануляторе при различном их значении. Результаты компьютерного моделирования для различных начальных скоростей газового потока показаны на рис. 26.

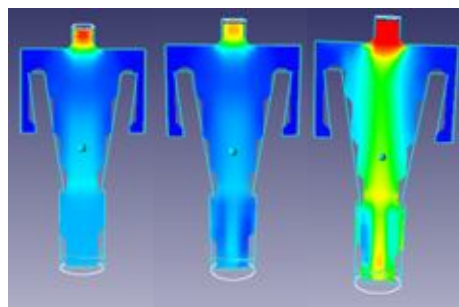
Анализ рис. 26 показывает увеличение интенсивности образования вихрей с повышением начальной скорости газового потока. При этом наблюдается их стабилизация.

Выход гранулятора на рабочий режим – важный вопрос, который можно решить с применением компьютерного моделирования. Распределение скорости газового потока в вихревом грануляторе в разные промежутки времени показано на рис. 27. Наблюдаются постепенное образование вихрей, их стабилизация и продвижение по высоте вихревого гранулятора. После выхода гранулятора на рабочий режим вихревое движение газового потока стабилизируется по всему рабочему объёму.



а б в

Рис. 26. Заливка поля скоростей газового потока в рабочем пространстве гранулятора (лопаточный распределитель газа) при начальной скорости газового потока: а – 2 м/с; б – 4 м/с; в – 7 м/с



а б в

Рис. 27. Заливка поля скоростей газового потока в рабочем пространстве гранулятора (выход на рабочий режим): а – распределение теплоносителя в нижнем сечении гранулятора; б – образование вихревого потока теплоносителя; в – рабочий режим

2.3. Формирование вихревого взвешенного слоя гранул [31]

По результатам компьютерного моделирования определены характерные зоны распределения двухфазного потока по объёму рабочего пространства вихревого аппарата с прогнозированием образования участков с повышенной

интенсивностью движения дисперсного материала и застойных областей. Развитие вихревого взвешенного слоя изучено поэтапно от начала его формирования до выхода на рабочий режим (рис.28).

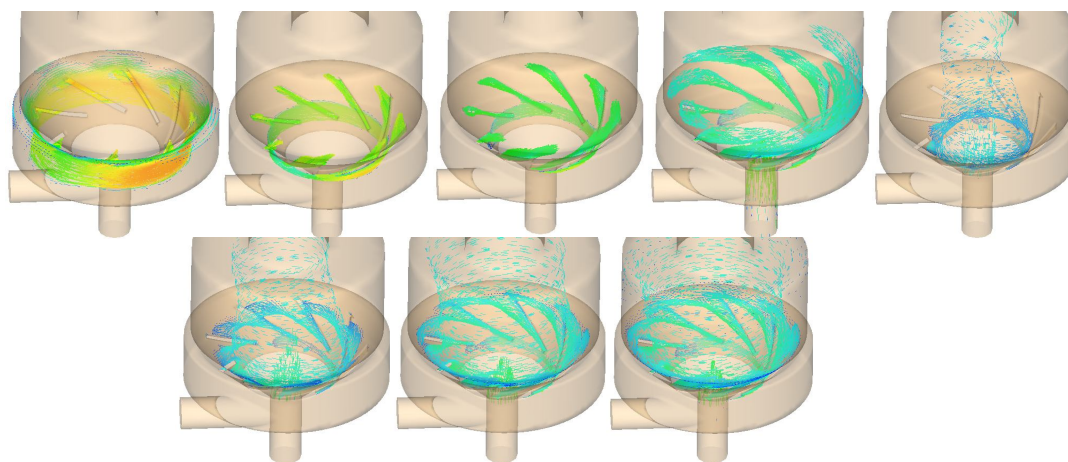


Рис. 28. Формирование вихревого взвешенного слоя гранул

3. Анализ результатов, выдача рекомендаций к выбору оптимальной конструкции вихревых грануляторов

Анализ результатов исследований позволил определить закономерности влияния конструкции вихревого гранулятора на распределение скорости движения газового потока.

Конфигурация завихрителя:

- при увеличении угла наклона лопаток окружная скорость газового потока по сечению рабочего пространства снижается;
- при увеличении угла наклона лопаток образовывается хаотическое завихрение газового потока у газораспределительного устройства;
- при увеличении числа лопаток происходит неравномерное распределение скоростей – скорость газового потока при входе значительно больше, чем при выходе из аппарата;
- при увеличении угла наклона лопаток образовываются большие области застойных зон гранул.

Конфигурация рабочего пространства:

– при увеличении угла раскрытия конуса в центре образуются большие области застойных зон;

– при конфигурации рабочего пространства в виде цилиндра наблюдается неравномерность распределения окружной скорости газового потока – скорость при входе значительно больше, чем при выходе из аппарата, а в центре образуются зоны пониженной скорости;

– при конфигурации рабочего пространства в виде конфузора скорость газового потока значительно возрастает по мере прохождения им рабочего пространства аппарата.

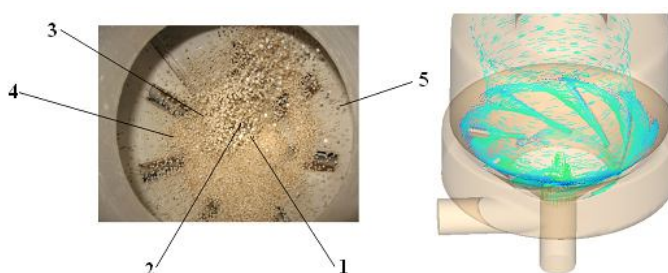


Рис. 29. Характерные зоны движения гранул в вихревом аппарате с рабочим пространством типа «цилиндр-диффузор»: 1 – зона создания вихревого потока; 2 – центральная зона с взвешенным слоем фонтанирующего типа; 3 – зона комбинированного взвешенного слоя; 4 – зона вихревого движения гранул; 5 – зона уменьшения интенсивности движения гранул

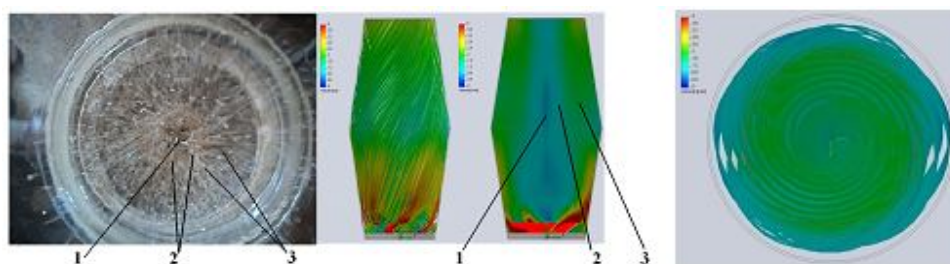


Рис. 30. Характерные зоны движения гранул в вихревом аппарате с рабочим пространством типа «диффузор-конфузор»: 1 – зона пониженной скорости движения гранул; 2 – зона фонтанирующего движения гранул; 3 – зона вихревого движения гранул

Различный характер распределения полей скоростей газового потока в рабочем пространстве вихревого гранулятора позволяет получать гранулы из

материалов с различными свойствами (прочность, термическая устойчивость, пористость и т. п.).

Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными [32] (рис. 29,30) позволило оценить характерные зоны движения гранул в рабочем пространстве различной конфигурации.

Выводы

Таким образом, полученные результаты исследования гидродинамики вихревых потоков позволяют произвести подбор оптимальной конфигурации рабочего пространства, конструкции завихрителя и конструктивных особенностей отдельных узлов ВГВС. При этом обеспечивается необходимое качество готовой продукции в зависимости от требований к термообработке и прочности.

Разработанные на основании расчётов конструкции вихревых грануляторов [31] (рис. 31) позволяют получать:

- гранулы из растворов (расплавов) с проведением их классификации по размеру;

- гранулы пористой структуры с сохранением их прочности (без разрушения внутренней кристаллической структуры).

Основные преимущества вихревых грануляторов:

- возможность существенного уменьшения габаритных размеров (в частности высоты) рабочего пространства;

- увеличение времени пребывания гранулы в рабочем пространстве вихревого аппарата;

- возможность управления движением гранулы в рабочем пространстве гранулятора;

- возможность создания в объеме рабочего пространства гранулятора интенсивной турбулентности;

- универсальность (возможность проведения процессов грануляции и сушки в объеме одного устройства);

- технологичность и простота изготовления;
- возможность быстрой переналадки и изменения конструктивных и технологических параметров при необходимости.

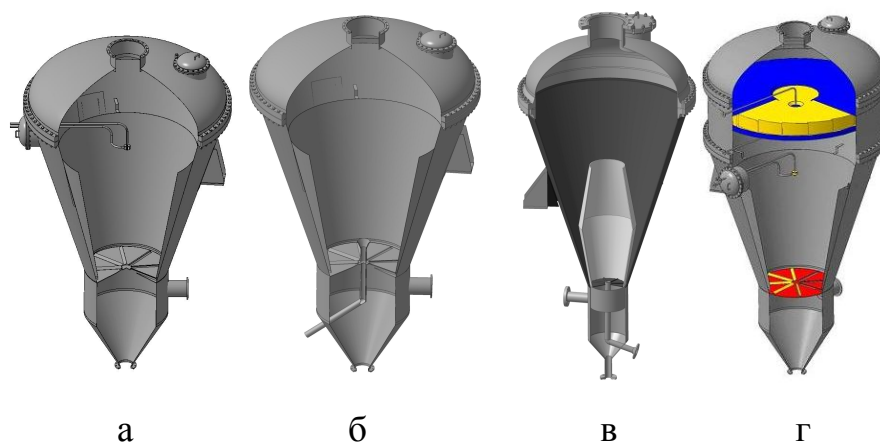


Рис. 31. Конструкции вихревых грануляторов: а – с распылением расплава; б – с предварительным увлажнением гранул и простым внутренним корпусом; в – с предварительным увлажнением гранул и составным внутренним корпусом; г – с сепарационной секцией

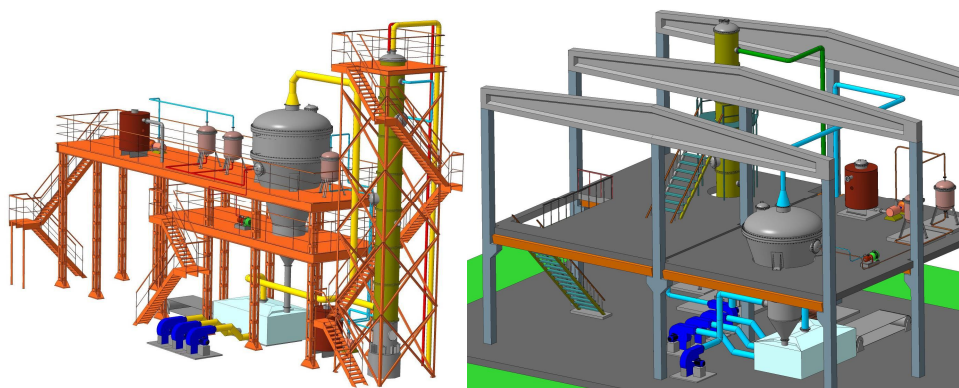


Рис.32. Варианты технологических линий получения гранулированного продукта с применением ВГВС

Литература:

1. Litster J., Ennis B.. The science and engineering of granulation processes. – Springer-Science+Business Media, 2004. – 250 p.
2. Parikh D.M. Handbook of Pharmaceutical Granulation Technology. – New York: Informa Healthcare, 2010. – 659 p.
3. Yang W-C. Handbook of fluidization and fluid-particle systems. – New York: Marcel Dekker, 2003. – 850 p.

4. Gidaspow D. Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions with applications. – San Diego: Academic Press, Inc, 1994. – 467 p.
5. Kunii D, Levenspiel O. Fluidization engineering. – Butterworth – Heinemann, 1991. – 491 p.
6. Marrone L., Scotto A. New Technology for Urea Solidification: Vortex Granulator & Vibrating Skin Bucket. – The Casale 3rd Customer Symposium, 2011. – P. 3-7.
7. Ashcraft R.W., Heynderickx G.J., Marin G.B. Modeling fast biomass pyrolysis in a gas–solid vortex reactor. – Chemical Engineering Journal. — 2012. – Vol. 207–208. – P. 195–208.
8. Biswas G., Chattopadhyay H., Sinha A. Augmentation of Heat Transfer by Creation of Streamwise Longitudinal Vortices Using Vortex Generators. – Heat Transfer Engineering. – 2012. – Vol. 33, №. 4–5. – P. 406–424.
9. Dorfeshan M., Marghzar S.H. Development of a Cone Vortex Stabilizer to Improve Cyclone Separator Performance. – Journal of Applied Sciences. – 2011. – Vol. 11. – P. 179–218.
10. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. – М.: Физматлит, 2010. – 288 с.
11. Sklabinskyi V.I., Artyukhov A.E., Kononenko N.P. Environmental aspects implementation of high-granulation equipment for the production of nitrogen fertilizers. – International Journal of Sustainable Development. – 2013. – Vol. 13. – P. 10–16.
12. Artyukhov A.E., Demchenko A.N. Refinement of porous ammonium nitrate obtaining methods in vortical devices. – Acta Universitatis Pontica Euxinus. – 2013. – Vol. II. – P. 10–12.
13. Artyukhov A.E. Vortical type granulators in the chemical industry. – Proceedings of the SSU staff and students scientific conference. – 2006. – Part 2. – P. 32–33.

14. Neuwirth M.A.V. Vortex Methods for Fluid Simulation in Computer Graphics. – Thesis for the Ph.D. degree in Computer Science. – University of Ottawa. – 2013. – P. 114–116.

15. Paulose M.M. Hydrodynamic study of swirling fluidized bed and the role of distributor. – Thesis for the Ph.D. degree. – Cochin university of science and technology. – 2006. – 124 p.

16. Džiugys A., Navakas R., Šlančiauskas A., Stravinskas G., Kačianauskas R. Numerical simulation of mixing and segregation of granular material. – *Mechanika*. – 2005. – Vol.3 (53). – P. 52–56.

17. Okada Y., Ohwaki T., Uesugi K., Taguchi Y., Ozawa H., Suzuki T., Yamazaki R., Jimbo G. Granulation in a Tapered-Fluidized Bed and Its Dominant Factors. – *Journal of the Society of Powder Technology*. – 1992. – Vol. 29, no. 12. – P. 891–896.

18. De Souza F.J., Silva A.L., Utzig J. Gas-particle flow in a diffuser. – *Proceedings of 22nd International Congress of Mechanical Engineering*. – 2013. – P. 2070–2082.

19. Armfield S.W., Cho N-M., Fletcher C.A.J. Prediction of Turbulence Quantities for Swirling Flow in Conical Diffusers. – *AIAA Journal*. – 1990. – Vol. 28, No 3. – P. 453–460.

20. Ahmadzadeh A., Arastoopour H., Teymour F. Numerical simulation of gas and particle flow in a rotating fluidized bed. – *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2003. – Vol. 42. – P. 2627–2633.

21. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки – М.: Мир, 1987. – 588 с.

22. Сугак Е.В. Моделирование и интенсификация процессов очистки промышленных газовых выбросов в турбулентных газодисперсных потоках: дисс....д-ра техн. наук. – Красноярск: Сибирский государственный технологический университет. – 1999. – 320 с.

23. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.

24. Zhaofeng Tian. Numerical modelling of turbulent gas-particle flow and its applications. – Thesis for the Ph.D. degree. – School of Aerospace, Manufacturing & Mechanical Engineering RMIT University. – 2006. – 149 p.

25. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Наука, 1974. – 832 с.

26. Жеба К.В. Гідродинаміка двофазних вихрових потоків. Вплив на габарити грануляційного обладнання. – Хімічна промисловість України. – 2009. – № 4. – С. 47-52.

27. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

28. Artyukhov A.E. The influence of the work space design of the vortex granulator on the nature of the granules movement. – Chemistry and Chemical Technology: Proceedings of the 3rd International Conference of Young Scientists. – 2013. – P. 174–175.

29. Артюхов А.Є. Демченко А.М. Визначення оптимальних конструктивних параметрів апаратів вихрового типу для отримання гранульованих продуктів з особливими властивостями. – Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. –2012. – № 4. – С. 21–27.

30. Артюхов А.Е., Демченко А.Н. Моделирование гидродинамических условий равновесия дисперсной фазы в малогабаритных вихревых аппаратах для создания гранул с особыми свойствами. – Матеріали Третьої міжнародної науково-практичної конференції «Комп'ютерне моделювання в хімії, технологіях і системах сталого розвитку». – 2012. – С. 117–119.

31. Artyukhov A.E. Computer Simulation of Vortex Flow Hydrodynamics Journal of Manufacturing and Industrial Engineering. – 2013. – Vol.12 (3-4). – P. 25–29.

32. Artyukhov A., Fursa O., Moskalenko K. Investigation of the Gas Stream Motion in the Vortex Granulator. – International Journal of Research and Innovations in Science and Technology. – 2014. – Vol. 1. – P. 11–17.

Артюхов А.Е. Численное моделирование гидродинамики потоков в вихревом грануляторе взвешенного слоя / А.Е.Артюхов // Высокоэффективные технологии как неотъемлемая часть развития современного общества: Монография / (В.Н. Антонов, И.Я. Львович, О.Н. Чопоров и др.). – Одесса: Куприенко С.В., 2015. – С. 39-61.