

**В.И. Тимошенко, Ю.В. Кнышенко,  
Ю.Г. Ляшенко, А.Е. Дешко, А.В. Осадчий**

Институт технической механики НАН Украины и НКА Украины, Днепропетровск

## **МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОСНОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АППАРАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФОНТАНИРУЮЩЕГО СЛОЯ**



Предложена методика обоснования конструктивных и режимных параметров технологических аппаратов с фонтанирующим слоем сыпучих материалов на основе экспериментального моделирования газодинамических процессов на маломасштабной и полномасштабной установках. По результатам экспериментов на установках различного масштаба сформулированы требования к конструкции рабочей части технологического аппарата, уровню начального заполнения исходным продуктом и режиму подачи газовой смеси в обеспечение эффективного протекания технологического процесса фонтанирования. Получены зависимости для определения пускового давления, давлений и скоростей, соответствующих началу и концу устойчивого фонтанирования для различных сыпучих материалов на маломасштабной и полномасштабной установках. Полученные результаты коррелируют с известными литературными данными и могут быть использованы при разработке технологических аппаратов, работающих в режиме фонтанирующего слоя.

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* фонтанирующий слой, сыпучий материал, технологический аппарат, моделирование, экспериментальная установка, масштабный эффект.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Фонтанирующий слой получил широкое применение в различных технологиях [1–4]:

- + при сушке гранулированных полимеров и зерна, суспензий и растворов на инертных частицах;
- + гранулировании расплавов или растворов;
- + охлаждении удобрений;
- + покрытии (капсулировании) гранул (таблеток) в химической, ядерной и медицинской промышленности;
- + смешивании твердых гранул из различных материалов.

Основное преимущество фонтанирующего слоя в технологических процессах, связанных с сушкой, нагревом и охлаждением при гранулировании твердых частиц, состоит в интен-

сивном перемешивании твердых частиц, обеспечивающем эффективное контактирование газа и твердого материала. При гранулировании и нанесении покрытий (капсулировании) регулярное циклическое движение твердых частиц способствует равномерному осаждению капель гранулянта (капсулянта) на поверхность фонтанирующих частиц. Столкновение частиц в ядре фонтана имеет определяющее значение при сушке суспензий и растворов на инертных телах, дроблении и коксовании угля. Эффективность технологических процессов, основанных на использовании фонтанирующего слоя, по сравнению с традиционными технологиями доказана мировой практикой.

Известны промышленные установки [1], используемые для:

- + сушки зерен гороха, чечевицы, льна, гранул нитрата аммония и желатина (производительностью от 100 до 1700 кг/ч);

- + сушки растворов и суспензий красителей в слое инертных частиц (производительностью до 500 кг/ч) [2];
- + гранулирования удобрений и химикатов (производительностью до 4 000 кг/ч);
- + капсулирования лекарственных таблеток (производительностью порядка 70 кг/ч);
- + производства искусственного корма для рыб и удобрений;
- + перемешивания стружки или кусочков полиэфира при получении волокна в установках объемом до 57 м<sup>3</sup>;
- + охлаждения удобрений от 120 до 40 °С (производительностью до 30 т/ч).

В публикациях, касающихся фонтанирующего слоя, представлено большое количество лабораторных и полупромышленных установок, предназначенных для разработки и обоснования технологических процессов измельчения твердых частиц на инертных частицах, пиролиза сланцев, восстановления железной руды, производства цементного клинкера и др.

При отработке этих технологий существенное значение имеет обоснование правомерности переноса результатов экспериментов с установок уменьшенного масштаба на натурные условия промышленного технологического аппарата. Поскольку полностью смоделировать на маломасштабных установках все аспекты технологического процесса с фонтанирующим слоем не представляется возможным, то для выявления масштабных эффектов (механической и гидродинамической природы, тепло- и массообмена в двух- и трехфазной среде, химического взаимодействия и др.) необходима отработка на пилотных и полупромышленных установках. При этом определяющими являются эффекты, связанные с механическими и гидродинамическими свойствами сыпучего материала и несущего газа [5].

Литературных данных о гидродинамических параметрах фонтанирующих слоев, полученные на промышленных установках или модельных установках натурального масштаба, очень мало и они не дают возможности одно-

значно судить о влиянии масштабных эффектов на процесс фонтанирования.

Так, результаты систематических исследований с зерновыми материалами, полученные разными авторами на установках с диаметрами входного отверстия  $D_{вх}$  от 12–20 до 100 мм показывают практическую независимость скорости начала фонтанирования, в то время как эксперименты с этими же сыпучими средами на промышленной установке с  $D_{вх} = 150$  мм свидетельствуют о ее росте с увеличением масштаба [1]. Эксперименты с сыпучим материалом из смеси пасты и зернофуражной дерти [6] на установках с диаметрами входного отверстия от 50 до 150 мм показывают, что с ростом масштаба установки скорость начала фонтанирования возрастает от 8–9 до 16–18 м/с.

Количественная оценка влияния масштабного эффекта на скорость начала фонтанирования при переходе к промышленным установкам зависит от вида сыпучего материала и для каждого конкретного случая требует своего экспериментального подтверждения.

Для сокращения материальных и временных затрат при отработке технологических процессов в аппаратах с фонтанирующим слоем целесообразно провести исследование влияния масштабных эффектов, связанных с механикой сыпучих материалов и гидродинамическим взаимодействием твердых частиц с несущим газом на макетных установках разного масштаба с учетом геометрических особенностей аппарата и технологического регламента.

При проведении исследований, связанных с отработкой этих технологий, необходимо учитывать особенности движения газа и частиц в фонтанирующем слое.

#### **КАРТИНА ПРОТЕКАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В АППАРАТАХ С ФОНТАНИРУЮЩИМ СЛОЕМ**

Для фонтанирующего слоя сыпучего материала характерны следующие области (рис. 1):

- + центральный канал захвата и разгона частиц вертикальным потоком газа — ядро фонтана (1);

- † центральная часть фонтана с восходящим потоком частиц (2);
- † периферийная часть фонтана из ниспадающих частиц (3);
- † кольцевой насыпной слой опускающихся вниз частиц, ограниченный боковой поверхностью аппарата и поверхностью ядра фонтана (4).

В канале захвата и разгона, длина которого определяется высотой начального насыпного слоя  $H_{тв}$ , частицы разгоняются до некоторой скорости  $V_k$ . Сечение выхода из канала практически совпадает с верхней поверхностью кольцевого насыпного слоя и является нижним сечением центральной части фонтана. Скорость газа в центральной части фонтана изменяется вследствие турбулентного перемешивания в периферийной части фонтана и обмена импульсом с поднимаемыми частицами.

Исходя из структуры струи, вытекающей из разгонного канала, центральную часть фонтана условно можно разделить на две части. К нижней части фонтана отнесем начальный участок струи. Здесь влияние турбулентного перемешивания не сказывается на параметрах на оси струи и несущая способность струи относительно частиц изменяется незначительно. В этой части фонтана продолжается ускорение частиц, хотя интенсивность его уменьшается. К верхней части фонтана отнесем переходный и основной участки струи. Здесь скорость струи уменьшается и несущая способность газа падает, скорость движения частиц изменяется в основном под влиянием их веса. Происходит торможение частиц и формирование вершины фонтана. В области центральной части фонтана, расположенной на некотором расстоянии от поверхности насыпного слоя, скорость частиц становится практически равной нулю и под действием силы тяжести они начинают опускаться в периферийной части фонтана на поверхность кольцевого насыпного слоя. В кольцевом насыпном слое частицы опускаются вниз с небольшой скоростью, замещая частицы, захваченные по-

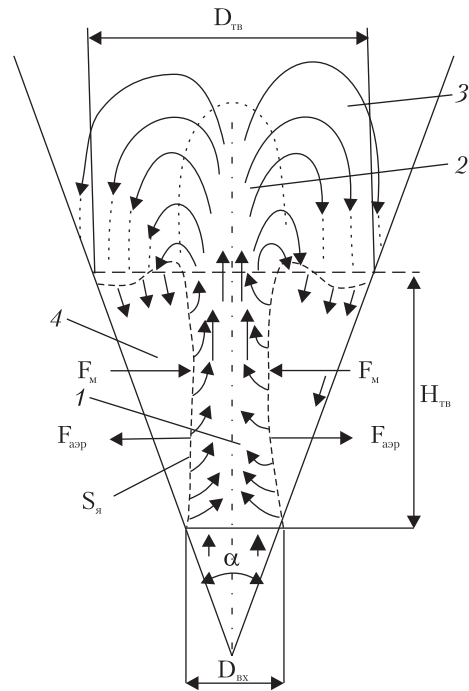


Рис. 1. Схема фонтанирующего слоя

током воздуха в центральном канале. В течение технологического процесса частицы совершают большое количество таких циклов.

### ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛО-МАССООБМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ФОНТАНИРУЮЩИЙ СЛОЙ

Все разнообразие технологических процессов, связанных с тепло-массообменом в фонтанирующем слое между газом и твердыми или жидкими частицами, может быть сведено к рассмотрению процессов сушки и нанесению покрытий.

В технологиях процесса сушки частиц длительность его определяется требованием снижения влажности частиц до нужной величины. Длительность определяется в основном суммарным временем пребывания частиц во взвешенном состоянии в течение всех циклов.

В технологиях капсулирования длительность процесса определяется необходимостью покрытия поверхности всех частиц капсулятом. Для технологического процесса капсули-

рования время пребывания частиц во взвешенном состоянии является определяющим на каждом из циклов, поскольку в течение этого времени из капель капсулянта, попавших на поверхность частиц в центральном разгонном канале, должен испариться растворитель. Капсулянт, попавший на частицу, должен прийти в состояние, не допускающее слипания частиц при их взаимном контакте в кольцевом насыпном слое. Допустимое время пребывания частиц во взвешенном состоянии существенным образом определяется теплофизическими свойствами раствора капсулянта: теплотой испарения растворителя, зависимостью давления насыщенных паров от температуры, временем кинетического испарения. Большое значение имеет и способность капсулянта к быстрому затвердеванию по мере испарения растворителя. Все перечисленные свойства раствора капсулянта являются определяющими при выборе параметров процесса капсулирования в фонтанирующем слое. На основании этого выдвигаются требования как к процентному содержанию полимера в растворе, так и к формированию смеси несущего газа с каплями раствора капсулянта, включая размеры капель, их объемное содержание в несущем газе и др. Эти требования являются исходными данными для параметров фонтанирующего слоя и смеси несущего газа с каплями капсулянта. Таким образом, задача окончательной отработки технологии капсулирования должна рассматриваться в постановке, учитывающей влияние и взаимодействие всех перечисленных выше факторов.

#### **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ ВЫБОРА И ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Одним из основных этапов разработки технологических аппаратов с фонтанирующим слоем является экспериментальная отработка на модельных установках условий и возможностей реализации промышленных агрегатов. В литературных источниках можно найти об-

ширную информацию об экспериментальных установках и множество технологических приложений с реализацией аппаратов с фонтанирующим слоем, их производительности, геометрии и другим параметрам [1–4, 6–7].

Технологические аппараты, работающие с использованием фонтанирующего слоя, можно разделить на следующие основные группы по конструктивному оформлению:

- ✦ конические аппараты с углами конусности от 10 до 90°;
- ✦ цилиндроконические аппараты с углами конусности от 30 до 180°;
- ✦ цилиндрические аппараты без конической части;
- ✦ аппараты другого типа (щелевые, плоские, "полукруговые").

Определяющими размерами этих аппаратов являются диаметры отверстий для подачи несущего газа, углы конусности входных участков, диаметры цилиндрической части. Испытываемые сыпучие материалы отличаются крупностью и формой частиц, плотностью материала частиц  $\rho_c$  и насыпной плотностью слоя  $\rho_n$ , углом естественного откоса.

При проведении многопараметрических экспериментальных исследований целесообразно использовать маломасштабную установку, позволяющую выяснить основные взаимосвязи геометрических параметров установки, расходов газа и сыпучего материала без значительных материальных затрат и в кратчайшие сроки. В состав установки входит набор моделей рабочей части технологического аппарата с различными углами конусности. Модели рабочей части аппарата изготавливаются в двух вариантах: "круговая" коническая модель и "полукруговая" модель, которая представляет собой половину конуса, ограниченную плоскостью с осью симметрии конуса.

Исследования проводятся в два этапа: на "круговой" и "полукруговой" установках.

"Круговая" установка используется для подбора геометрических и режимных параметров, обеспечивающих устойчивое фонтаниро-

вание сыпучего материала. К этим параметрам относятся угол конусности, относительный уровень начальной засыпки сыпучего материала, скорости начала и конца устойчивого фонтанирования, зависимости пусковых давлений и давлений устойчивого фонтанирования от свойств сыпучего материала и др.

Эксперименты на "полукруговой" установке проводятся для определения структурных характеристик фонтанирующего слоя — формы ядра фонтана, траектории и скорости частиц в различных зонах фонтана, времени циркуляции частиц и др.

При составлении программы параметрических исследований на маломасштабной установке должны быть учтены известные ограничения, справедливые для аппаратов с различными диаметрами, выполнение которых обязательно для обеспечения устойчивого фонтанирования [1, 2, 7, 8]. Для аппаратов конического типа необходимо, чтобы:

- а) размер твердых частиц был не менее 1—2 мм;
- б) угол раскрытия конуса  $\alpha \geq 30 \div 40^\circ$  и определяется с учетом угла естественного откоса материала  $\varphi$ :  $\alpha = 180^\circ - 2(\varphi + 30 \div 40^\circ)$ ;
- в) отношение диаметров верхнего и нижнего оснований слоя  $D_{\text{тв}} / D_{\text{вх}} \geq 3$ ;
- г) высота насыпного слоя  $H_{\text{тв}} \geq 2 D_{\text{вх}}$ .

При нарушении одного из перечисленных условий обеспечение устойчивого фонтанирования в коническом аппарате становится невозможным.

Полученная на лабораторных установках малого масштаба информация является базой для создания полномасштабной модельной установки проектируемого аппарата, основной целью которой является проверка обоснованности выбора конструктивных и режимных параметров технологического аппарата.

Полномасштабная установка используется также для выбора газораспределительного устройства на входе в аппарат. Это устройство должно обеспечивать равномерный профиль

скорости независимо от конфигурации подающих трубопроводов, режимов работы, циклограммы совместной работы нескольких агрегатов с фонтанирующим слоем, питающихся от одного газонагнетателя. Необходимость этого этапа исследований определяется тем, что моделирование на маломасштабных установках не позволяет выдержать подобие течений газа в сетках и перфорированных пластинах, являющихся, как правило, элементами газораспределительных устройств [9].

Следовательно, моделирование процессов фонтанирования сыпучих материалов проводится в такой последовательности. На маломасштабной установке при широком варьировании основных параметров (угол конусности, уровень начальной засыпки, свойства сыпучих материалов) исследуется их влияние на характер фонтанирования и обеспечение технологических требований. По результатам этих исследований выбираются геометрические параметры натурной установки, на которой подтверждаются обоснованность выбора этих параметров.

Для обеспечения возможности переноса результатов с маломасштабной установки на полномасштабную необходимо соблюдать критерии подобия процесса фонтанирования, отражающие подобие геометрических параметров исследуемого аппарата, характеристик сыпучего материала и несущего газа.

В случае, когда испытания на натурном несущем газе (смеси газов) в силу каких-либо причин невозможно провести, испытания проводятся на воздухе, при этом должно быть учтено различие в вязкости и плотности между этими средами. При наличии существенных различий этих параметров их компенсация для соблюдения подобия в характере обтекания частиц в фонтанирующем слое может быть осуществлена за счет соответствующего подбора имитатора сыпучего материала. При выборе имитатора сыпучего материала должно быть соблюдено подобие по форме частиц и свойствам сыпучей массы — углу естествен-

ного откоса и порозности  $\epsilon_0$ , характеризующей степень упаковки частиц ( $\epsilon_0 = 1 - \rho_n / \rho_t$ ).

### ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА МАЛОМАСШТАБНОЙ УСТАНОВКЕ

В соответствии с предложенной методикой для обоснования выбора углов конусности нижней части технологического аппарата используется маломасштабная установка с диаметром входного отверстия 60 мм и со сменными конусами 30°, 44°, 52°, 60°, 70°, выполненными из прозрачной ПВХ-пленки. Общий вид маломасштабной установки приведен на рис. 2.

Прозрачные стенки конусов обеспечивали возможность визуального контроля процесса фонтанирования и проведения видеосъемки.

Перепад давлений, снимаемый с приемников статического давления, выполненных в стенках калиброванных труб расходомерного устройства, подается на чувствительный элемент дифференциального датчика давления типа "Сапфир-22ДД". Для определения перепада давления в фонтанирующем слое на различных этапах его формирования использован датчик давления типа ИКД6ТДФ-0,25. Выходные электрические сигналы с датчиков давления поступают на вход компьютера через аналого-цифровой преобразователь для визу-

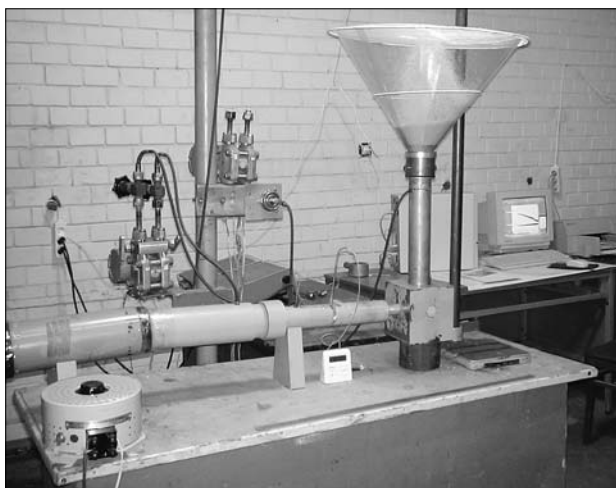


Рис. 2. Общий вид маломасштабной экспериментальной установки

### Влияние угла конусности на параметры фонтанирования (просо, $H_{тв} / D_{вх} = 3$ )

$\alpha^\circ$	$V$ , м/с	$\delta V$ , м/с	$\Delta\rho_{нф}$ , кПа	$\delta(\Delta\rho_{нф})$ , кПа
30	6,9–8,1	0,40	1,27–1,29	1,00–0,25
44	7,6–9,1	0,32	1,13–1,17	0,30–0,56
52	7,5–9,8	0,17–0,30	0,99–1,03	0,30–0,60
60	8,7–9,1	0,2–0,21	0,94–0,95	0,25–0,32
70	8,8–8,9	0,07–0,10	0,75–0,80	0,15–0,22

ального контроля в процессе эксперимента, хранения показаний датчиков в виде протоколов и их последующей обработки.

Типичные примеры записи показаний датчиков перепада давления и скорости воздуха при различных уровнях начального заполнения сыпучим материалом представлены на рис. 3 (см. вклейку).

Приведенные зависимости иллюстрируют различные фазы формирования фонтанирующего слоя:

- ✦ фильтрация воздуха через насыпной слой сыпучего материала (участки 0–А), отличающаяся ростом скорости и перепада давления;
- ✦ прорыв воздуха через слой сыпучего материала (участки А–В), сопровождающийся падением давления и ростом скорости;
- ✦ переход к началу фонтанирования и фонтанирование (участки В–С), степень устойчивости которого характеризуется уровнем пульсаций давления и скорости;
- ✦ конец устойчивого фонтанирования (участки С–D), свидетельством которого является рост пульсаций скорости и давления.

Полученные в результате обработки экспериментов среднеквадратичные отклонения давления и скорости при варьировании углов конусности ( $\alpha = 30^\circ, 44^\circ, 52^\circ, 60^\circ$  и  $70^\circ$ ) для равных уровней заполнения конусов сыпучим материалом (таблица) позволяют дать количественную оценку степени устойчивости фонтанирующего слоя.

На участках устойчивого фонтанирования относительная амплитуда пульсаций скорости не превышает 1–2 %. Относительная

амплитуда пульсаций давления при этом находится в пределах 6–22 %.

Из приведенных результатов следует, что максимальные амплитуды пульсаций избыточного давления и скорости воздуха наблюдаются при угле конусности 30°. По мере роста угла конусности относительные амплитуды пульсаций этих величин снижаются.

Для исследования структуры фонтанирующего слоя использована "полукруговая" модель с углом конусности 52°. С помощью видео съемки определено, что форма ядра фонтана имеет вид конуса, обращенного меньшим основанием к поверхности насыпного слоя. Такой вид ядро имеет для испытанных материалов как на маломасштабной, так и на полномасштабной установках (рис. 4, см. вклейку). Анализ фотоснимков с различными временами экспозиции позволяет определить такие структурные параметры фонтанирующего слоя как скорость частиц в различных зонах фонтанирующего слоя, траектории частиц при их движении в кольцевом слое и ядре (рис. 5, см. вклейку).

#### ТЕСТОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА ПОЛНОМАСШТАБНОЙ УСТАНОВКЕ

Для отработки методических положений переноса результатов, полученных на маломасштабной установке, была изготовлена установка, которая представляет собой экспериментальную модель маломасштабной установки М 6:1 — полномасштабная установка. В качестве конической части использованы круговые конусы с углами конусности 30° и 52°. Установка включает также "полукруговую" модель рабочей части с углом конусности  $\alpha = 52^\circ$ . Рабочая газовая смесь моделируется атмосферным воздухом. Используются различные сыпучие материалы (гранулы полиэтилена, зерна проса и пшена). Аналогов экспериментальных установок такого масштаба в литературных источниках не обнаружено. Общий вид полномасштабной установки представлен на рис. 6.

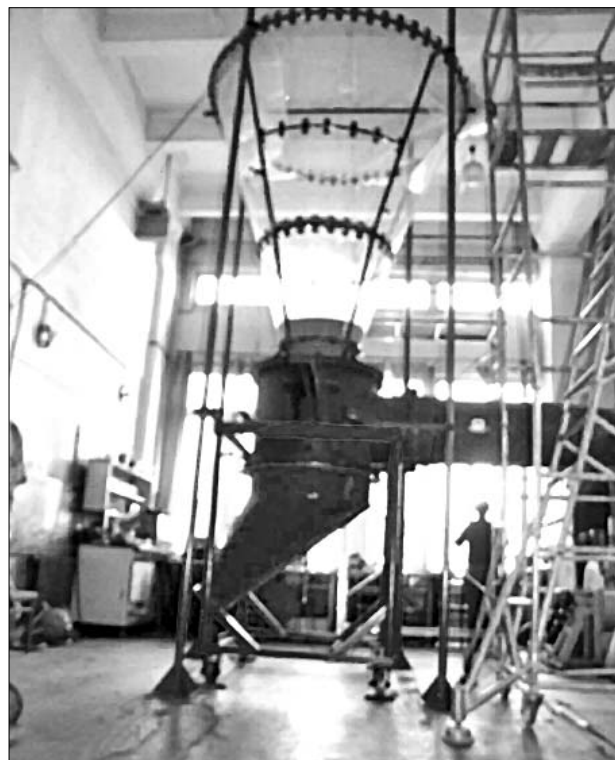


Рис. 6. Общий вид полномасштабной установки

При проведении испытаний на полномасштабной установке решались следующие задачи:

- + отработка конструкции входного газораспределительного устройства для обеспечения равномерности распределения скорости газа на входе в коническую часть аппарата независимо от конфигурации трубопроводов, подводящих воздух;
- + подтверждение известных литературных данных, касающихся обеспечения условий устойчивого фонтанирования, которые получены на модельных установках с диаметром входного отверстия от 12 до 100 мм [1, 2, 7];
- + подтверждение правомочности переноса результатов, полученных на маломасштабных установках, на установки больших размеров;
- + исследование газодинамических процессов при формировании и функционировании фонтанирующего слоя;
- + исследование структурных характеристик фонтанирующего слоя.

Результаты испытаний свидетельствуют, что при угле  $30^\circ$  конической части аппарата на полномасштабной (как и на маломасштабной) установке организовать процесс устойчивого фонтанирования не представляется возможным. Причиной периодического "заваливания" ядра фонтана твердой фазы является неустойчивость его границы. "Заваливание" границы твердой фазы происходит вследствие превышения сил, действующих на частицы твердой фазы изнутри периферийной зоны, над силами воздействия газового потока из ядра фонтана. Равновесие этих сил должно обеспечиваться соответствующими значениями параметров процесса, в том числе углов раствора конуса, высотой слоя твердой фазы, значениями порозности слоя, угла естественного откоса материала. Несоответствие этих факторов процесса требуемым значениям является причиной дестабилизации процесса фонтанирования.

Результаты испытаний пшеницы, полиэтилена и проса на полномасштабной установке с углом конусности  $52^\circ$  показали, что для всех трех сыпучих материалов существуют режимы устойчивого фонтанирования.

#### **УСЛОВИЯ ПЕРЕНОСА РЕЗУЛЬТАТОВ С МАЛОМАСШТАБНЫХ УСТАНОВОК НА ПОЛНОМАСШТАБНЫЕ (ПРОМЫШЛЕННЫЕ)**

Необходимым условием возможности переноса результатов экспериментов с установок малого масштаба на установки промышленного масштаба является геометрическое подобие исследуемых установок, подобие характеристик и свойств сыпучего материала как квазисплошной среды и газодинамическое подобие потоков, обеспечивающих фонтанирование сыпучего материала.

Параметрами, которые определяют геометрию установок, являются: диаметр входного отверстия для подачи газа  $D_{вх}$ , уровень начального заполнения конусной части сыпучим материалом  $H_{тв}$  или диаметр верхней поверхности насыпного слоя  $D_{тв}$  и угол конусности модели рабочей части аппарата  $\alpha_{кон}$ .

Для обеспечения устойчивого фонтанирования угол конусности рабочей части аппарата выбирается с учетом угла естественного откоса материала  $\varphi$  в соответствии с соотношением  $\alpha = 180^\circ - 2(\varphi + 30 \div 40^\circ)$ . При выборе имитатора сыпучего материала необходимо, чтобы наряду с углом естественного откоса  $\varphi$  его порозность  $\epsilon$  была близка к порозности натурального материала. В том случае, если на модельной и натурной установках используется один и тот же сыпучий материал, для геометрического подобия достаточно выполнения условий  $\alpha_{кон} = idem, D_{вх} / D_{тв} = idem (H_{тв} / D_{вх} = idem)$ .

Конечным результатом модельных испытаний является определение переходных коэффициентов для каждого из исследуемых параметров:  $A_n = k_A A_m$ , где  $A_n, A_m$  — искомые величины параметра на натуре и модели;  $k_A$  — переходный коэффициент.

Так как условия испытаний на полномасштабной модели принимаются подобными условиям эксплуатации на натурной установке по моделируемым гидродинамическим параметрам, то из сравнения результатов экспериментов на маломасштабной и полномасштабной установках могут быть определены переходные коэффициенты для основных параметров процесса формирования и существования фонтанирующего слоя:

- ✦ пускового давления  $\Delta p_{пл}$ ;
- ✦ давлений  $\Delta p_{нф}$  и скоростей  $V_{нф}$  начала фонтанирования;
- ✦ давлений  $\Delta p_{кф}$  и скоростей  $V_{кф}$  конца устойчивого фонтанирования.

Результаты параметрических исследований по влиянию определяющих факторов на изменение  $\Delta p_{пл}$ ,  $\Delta p_{нф}$  и  $\Delta p_{кф}$  показали, что из всех факторов наиболее существенным является отношение высоты засыпки  $H_{тв}$  к входному диаметру  $D_{вх}$  и давление столба сыпучего материала  $\rho_n g H_{тв}$ .

Фактические данные определения  $\Delta p_{пл}$  и  $\Delta p_{нф}$  ( $\Delta p_{кф} \approx \Delta p_{нф}$ ), полученные на маломасштабной модели и на полномасштабной уста-



новке, после усреднения их по методу наименьших квадратов позволяют получить следующие эмпирические зависимости для их оценки:

$$\frac{\Delta p_{\text{пл}}}{\rho_{\text{н}} g H_{\text{ТВ}}} = 0,9661 \frac{H_{\text{ТВ}}}{D_{\text{ВХ}}} - 0,0967 \left( \frac{H_{\text{ТВ}}}{D_{\text{ВХ}}} \right)^2;$$

$$\frac{\Delta p_{\text{нф}}}{\rho_{\text{н}} g H_{\text{ТВ}}} = 0,5151 \frac{H_{\text{ТВ}}}{D_{\text{ВХ}}} - 0,0963 \left( \frac{H_{\text{ТВ}}}{D_{\text{ВХ}}} \right)^2.$$

Из этих зависимостей следует, что параметры  $\bar{p}_{\text{пл}} = \Delta p_{\text{пл}} / \rho_{\text{н}} g H_{\text{ТВ}}$  и  $\bar{p}_{\text{нф}} = \Delta p_{\text{нф}} / \rho_{\text{н}} g H_{\text{ТВ}}$  могут быть приняты в качестве критериев подобия, что согласуется с литературными данными по фонтанирующим слоям [1, 2, 7]. Сравнение этих эмпирических зависимостей с экспериментальными данными, полученными на установках разного масштаба, приведено на рис. 7.

При равенстве насыпной плотности сыпучего материала для маломасштабной и полномасштабной установок переходный коэффициент моделирования равен линейному масштабу установок  $k_l = D_{\text{ВХ}}^{\text{н}} / D_{\text{ВХ}}^{\text{м}} = H_{\text{ТВ}}^{\text{н}} / H_{\text{ТВ}}^{\text{м}}$ .

Сравнение экспериментальных данных по скоростям  $V_{\text{нф}}$  и  $V_{\text{кф}}$  на маломасштабной и полномасштабной установках показало существенное влияние факторов  $H_{\text{ТВ}}$  и  $D_{\text{ВХ}}$ . Эмпирические зависимости для  $V_{\text{нф}}$  и  $V_{\text{кф}}$ , полученные на маломасштабной установке, имеют вид:

$$V_{\text{нф}}^{\text{м}} = V_{\text{в}} \left[ 0,2522 + 0,3072 \frac{H_{\text{ТВ}}}{D_{\text{ВХ}}} - 0,0229 \left( \frac{H_{\text{ТВ}}}{D_{\text{ВХ}}} \right)^2 \right];$$

$$V_{\text{кф}}^{\text{м}} = V_{\text{в}} \left[ -0,7157 + 1,393 \frac{H_{\text{ТВ}}}{D_{\text{ВХ}}} - 0,2094 \left( \frac{H_{\text{ТВ}}}{D_{\text{ВХ}}} \right)^2 \right],$$

где  $V_{\text{в}}$  — скорость газа, при которой частица находится во взвешенном состоянии (скорость витания частиц сыпучего материала).

Скорость витания  $V_{\text{в}}$  является основной аэродинамической характеристикой частиц и

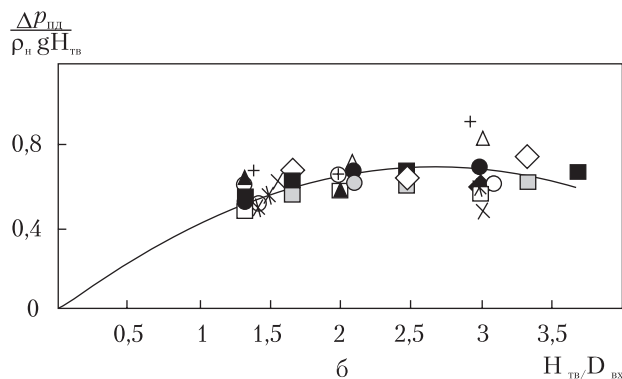
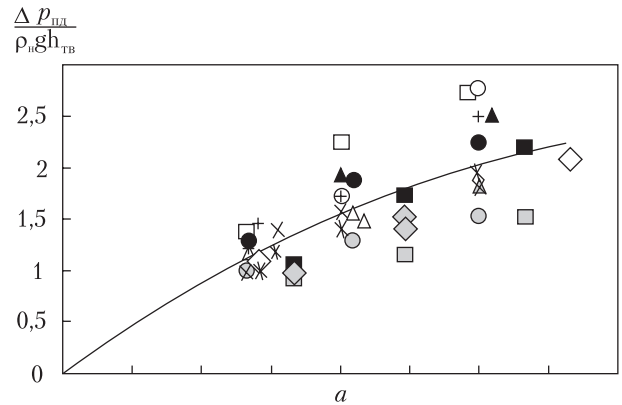


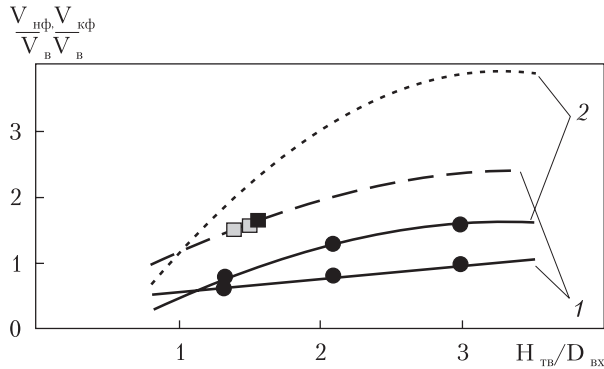
Рис. 7. Зависимость пускового давления (а) и давления начала фонтанирования (б) на разномасштабных моделях: маломасштабная модель (■ — пшено,  $\alpha = 44^\circ$ ; ● — пшено,  $\alpha = 52^\circ$ ; ○ — пшено,  $\alpha = 60^\circ$ ; □ — пшено,  $\alpha = 70^\circ$ ; ■ — просо,  $\alpha = 44^\circ$ ; ● — просо,  $\alpha = 52^\circ$ ; \* — просо,  $\alpha = 60^\circ$ ; × — просо,  $\alpha = 70^\circ$ ; ◇ — полиэтилен,  $\alpha = 44^\circ$ ; △ — полиэтилен,  $\alpha = 52^\circ$ ; ▲ — полиэтилен,  $\alpha = 60^\circ$ ; + — полиэтилен,  $\alpha = 70^\circ$ ); полномасштабная модель (\* — просо,  $\alpha = 52^\circ$ ; × — полиэтилен (полукруглая модель),  $\alpha = 52^\circ$ ; + — полиэтилен,  $\alpha = 52^\circ$ )

определяется

$$V_{\text{в}} = \sqrt{\frac{4(\rho_{\text{т}} - \rho)gd_{\text{т}}}{3\rho c_d}},$$

где  $d_{\text{т}}$  — средний диаметр частиц;  $\rho$  — плотность несущего газа;  $c_d$  — коэффициент лобового сопротивления частицы.

Комплексной аэродинамической характеристикой частицы, учитывающей важнейшие физические параметры частицы и прилегающего к ней пограничного слоя, является число Рейнольдса витания  $Re_{\text{вит}} = \frac{d_{\text{т}} V_{\text{в}} \rho}{\mu}$ , где  $\mu$  — ко-



**Рис. 8.** Зависимости скорости начала и конца фонтанирования проса от начальной высоты слоя на маломасштабной и полномасштабной моделях ( $\alpha = 52^\circ$ ): 1 –  $V_{нф} / V_{кф}$ ; 2 –  $V_{нф} / V_{кф}$ ; ●, ■ – эксперименты на маломасштабной и полномасштабной установках соответственно; - - - - расчет по формулам (3) и (4)

эффицент динамической вязкости несущего газа. Коэффициент аэродинамического сопротивления частиц  $c_d$  зависит от числа Рейнольдса газового потока, обтекающего частицу, ее формы, состояния поверхности, концентрации частиц в потоке. Для определения коэффициента в случае сферических частиц без учета взаимного аэродинамического влияния, а также с учетом, что средняя скорость обтекания частицы при движении в фонтане изменяется в пределах, соответствующих диапазону чисел Рейнольдса от 0 до 700 [10], может быть использована эмпирическая зависимость  $c_d = 0,5 + 29,2 Ar^{0,5} + 430 Ar^{-1}$ .

Увеличение объемной концентрации частиц в потоке  $\beta$  приводит к росту коэффициента  $c_d$ :  $c_d^{ct} = c_d (1 - \beta)^n$ ,  $n \approx 3$  [11] и соответствующему снижению скорости витания.

Используя число Архимеда  $Ar = \frac{g\rho(\rho_t - \rho)d_t^3}{\mu^2}$ , можно получить критериальное соотношение  $Re_b^2 = \frac{4Ar}{3c_d}$  из которого вытекает параметр

$$K_v = \frac{4Ar}{c_d Re_t^2}, \text{ где } Re_t = \frac{d_t V_t \rho}{\mu}; V_t - \text{ скорость}$$

частицы, который может быть использован в качестве критерия подобия фонтанирующего слоя с частицами, различающимися диамет-

ром, плотностью и формой, а также свойствами газовой среды. Если в качестве сыпучего материала используется одно и то же вещество как на модельной установке так и в натуральных условиях и при этом соблюдается подобие по объемной концентрации  $\beta$ , то подобие по критерию  $K_v$  выполняется автоматически.

Сравнение экспериментальных данных, полученных на маломасштабной и полномасштабной установках, показало, что переходный коэффициент для скоростей начала и конца устойчивого фонтанирования отличается от линейного масштаба установок. Расчетным путем этот коэффициент можно получить из анализа условия устойчивости границы между газовым потоком в канале ядра фонтана и плотным слоем сыпучего материала, которое определяется равенством действия вектора равнодействующих сил от аэродинамического воздействия радиального потока газа из ядра в плотный слой  $F_{aep}$  и вектора массовых сил плотного слоя  $F_m$  (см. рис. 1). В общем виде значения этих сил равны:  $F_{aep} = \frac{\psi \rho V_z^2 S_{я}}{2}$  и  $F_m = M g k_1$ , где

$\psi$  – коэффициент трения;  $V_z$  – усредненная радиальная скорость газа;  $S_{я} \approx \pi D_{вх} H_{тв}$  – площадь межфазной границы;  $M = W \rho_n$  – масса сыпучего материала в аппарате;  $W$  – объем сыпучего материала;  $k_1$  – коэффициент пропорциональности, который выражает степень разделения воздействия силы веса слоя между двумя граничными поверхностями – конической поверхностью аппарата и межфазной границей ядра.

Из условия равенства сил  $F_{aep}$  и  $F_m$  для модельных и натуральных условий имеем

$$\frac{\rho^H (V_z^H)^2 \psi^H S_{я}^H}{\rho_n^H W^H k_1^H} = \frac{\rho^M (V_z^M)^2 \psi^M S_{я}^M}{\rho_n^M W^M k_1^M}. \quad (1)$$

При геометрическом подобии модели и натуре  $k_1^H = k_1^M$  и подобии характеристик сыпучих материалов  $\psi_1^H = \psi_1^M$ ,  $\rho^H / \rho_n^H = \rho^M / \rho_n^M$  из соотношения (1) получим

$$V_z^H = V_z^M \sqrt{\frac{S_{я}^M W^H}{S_{я}^H W^M}}. \quad (2)$$

Учитывая, что для геометрически подобных установок  $W^n/W^m = k_l^3$ ,  $S_{\text{я}}^n/S_{\text{я}}^m = k_l^2$  расчетный переходной коэффициент моделирования для радиальной скорости перетекания  $k_v^p = \sqrt{k_l}$ . Поскольку изменение радиальной скорости пропорционально изменению скорости на входе в ядро фонтана, то с учетом кинематического подобия из формулы (2) следует:

$$V_{\text{кф}}^n = V_{\text{кф}}^m \sqrt{k_l}, \quad (3)$$

$$V_{\text{нф}}^n = V_{\text{нф}}^m \sqrt{k_l}. \quad (4)$$

Сравнение расчетных значений  $V_{\text{нф}}^n$  и  $V_{\text{кф}}^n$  с экспериментальными данными подтверждает адекватность расчетной оценки (рис. 8) и показывает, что скорость начала фонтанирования на полномасштабной установке, выполненной в масштабе 6:1 по отношению к маломасштабной в  $\sqrt{k_l} = 2,44$  раза больше, чем на маломасштабной установке. Этот результат коррелирует с данными, приведенными в работе [1] для промышленной установки с  $D_{\text{вх}} = 150$  мм по отношению к модельной установке с  $D_{\text{вх}} = 100$  мм и данными работы [6] для установок с  $D_{\text{вх}}$  от 50 до 150 мм.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для сокращения материальных и временных затрат при обосновании параметров технологических процессов сушки и капсулирования сыпучих материалов с фонтанирующим слоем целесообразно проведение исследований, связанных с гидродинамическим взаимодействием твердых частиц и несущего газа на модельных установках разного масштаба с учетом геометрических особенностей аппарата и технологического регламента.

Предложена методика экспериментального обоснования конструктивных и режимных параметров разрабатываемых технологических аппаратов, состоящая из двух этапов.

На первом этапе в результате параметрических исследований на маломасштабной экспериментальной установке при широком варьировании основных параметров (угол конус-

ности, уровни начальной засыпки и свойства сыпучих материалов) определяется влияние этих параметров на устойчивость фонтанирования в обеспечение технологических требований.

На втором этапе (по результатам исследований на маломасштабной установке) выбираются геометрические параметры модельной установки, близкой к промышленной, на которой подтверждается обоснованность выбора этих параметров, проводится отработка газораспределительного устройства, обеспечивающего равномерный профиль скорости несущего газа на входе в аппарат независимо от режимов работы нагнетательных агрегатов и конфигурации газопроводов. При существенном влиянии масштабных эффектов на параметры, обеспечивающие работоспособность фонтанирующего слоя, они должны быть учтены при разработке промышленного технологического аппарата.

Результаты параметрических экспериментов на маломасштабной установке с диаметром входного отверстия 60 мм и тестовых экспериментов на полномасштабной установке (линейный масштаб 6 : 1) позволили получить зависимости для определения пусковых давлений и давлений устойчивого фонтанирования, справедливые для установок различного масштаба. Значения скоростей газа, соответствующих началу и концу устойчивого фонтанирования, должны быть при переходе от маломасштабной к полномасштабной установке умножены на коэффициент, равный корню квадратному из линейного масштаба установки.

Описанные результаты получены при выполнении Институтом технической механики НАН Украины и НКА Украины научно-технического проекта "Разработка методики моделирования газодинамических процессов и определение параметров капсулирования аммиачной селитры в технологических аппаратах" в соответствии с Постановлением Бюро президиума НАН Украины № 131 от 20.04.2006 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матур К., Эстайн Н. Фонтанирующий слой. — Л.: Химия, 1978. — 288 с.
2. Романков П. Г., Рашковская Н. Б. Сушка во взвешенном состоянии. — Л.: Химия, 1979. — 272 с.
3. Сударушкин Ю.К., Павлюк В.В., Махов А.Н. Конвективно-лучевая сушка композиционного материала на основе полиамида в фонтанирующем слое // Журнал прикладной химии, 2005. — Т. 78, вып. 12. — С. 2008—2010.
4. Василюшин М.С., Братилов Б.И., Петров Е.А. и др. Установка с фонтанирующим слоем инертной насадки для сушки водносуспензии ультрадисперсного алмаза // Химическая промышленность, 2003, Т. 80, № 4. — С. 48—51.
5. Теплицкий Ю.С., Ковенский В.И. Дисперсные системы со взвешенными частицами: проблема масштабирования и критерии гидродинамического подобия // Инженерно-физический журнал, 1999, Т. 72, № 2. — С. 312—316.
6. Попов С.И. Экспериментальные исследования процесса сушки кормосмеси // Вестник Донского государственного технического университета, 2005, Т. 5, 31(23). — С. 92—100.
7. Рабинович М.И. Тепловые процессы в фонтанирующем слое. — К.: Наук. думка, 1977. — 170 с.
8. Лыков Н.В. Сушка в химической промышленности. — М.: Химия, 1970. — 432 с.
9. Идельчик И.Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1983. — 351 с.
10. Бабуха Г.Л., Рабинович М.И. Механика и теплообмен потоков полидисперсной газозвеси. — К.: Наук. думка, 1969. — 211 с.
11. Горбис Э.Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков. — М.: Энергия, 1970. — 424 с.

*В.І. Тимошенко, Ю.В. Книшенко,  
Ю.Г. Ляшенко, Г.Є. Дешко, О.В. Осадчий*

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО  
ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ  
ПАРАМЕТРІВ АПАРАТІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ  
ФОНТАНУЮЧОГО ШАРУ

Запропонована методика обґрунтування конструктивних і режимних параметрів технологічних апаратів з фонтануючим шаром сипучих матеріалів на основі експери-

ментального моделювання газодинамічних процесів на маломасштабній і повномасштабній установках. На основі результатів експериментів на установках різного масштабу сформульовані вимоги до конструкції робочої частини технологічного апарату, рівня початкового заповнення вихідним продуктом і режиму подачі газової суміші для забезпечення ефективного протікання технологічного процесу з фонтануючим шаром. Отримано залежності для визначення пускового тиску, тисків і швидкостей, що відповідають початку й кінцю стійкого фонтанування для різних сипучих матеріалів на маломасштабній та повномасштабній установках. Отримані результати корелюють із відомими літературними даними й можуть бути використані при розробці технологічних апаратів, що працюють у режимі фонтануючого шару.

*Ключові слова:* фонтануючий шар, сипучий матеріал, технологічний апарат, моделювання, експериментальна установка, масштабний ефект.

*V.I. Timoshenko, Yu.V. Knyschenko,  
Yu. G. Ljashenko, A. E. Deshko, A. V. Osadchy*

TECHNIQUE OF EXPERIMENTAL  
SUBSTANTIATION OF TECHNOLOGICAL  
PARAMETERS OF DEVICES WITH THE SPOUTING  
BED APPLICATION

The technique of design and regime parameters substantiation of technological devices with a spouting bed of loose materials on the basis of gasdynamic processes experimental modelling on small-scale and full-scale installations is proposed. Using the results of experiments on various scale plants the requirements to design of the working part of the technological device, level of starting filling by initial product, and mode of gas mixture submission to provide the effective technological process with spouting bed are formulated. For various loose materials on small-scale and full-scale installations the dependencies for the definition of starting pressure, pressures and rates corresponding to the beginning and the end of steady spouting are received. The results obtained correlate with known literary data and can be used in development of technological devices working in spouting bed mode.

*Key words:* spouting bed, loose material, technological device, modelling, experimental installation, scale effect.

*Надійшла до редакції 27.06.07.*