

Канд. физ-мат. наук В. И. Елисеев,  
инж. А. В. Кривокорытов,  
канд. техн. наук В. И. Луценко  
(ИГТМ НАН Украины)

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ПЕРЕТЯЖКИ ЖИДКОСТИ МЕЖДУ ЧАСТИЦАМИ СЫПУЧЕГО СЛОЯ ПРИ ОБЕЗВОЖИВАНИИ**

Представлено результати модельних експериментів по вивченню утворення рідкої перетяжки між двома сферичними частками при опусканні вільної поверхні рідини. Показано, що в динаміці відстань між частками, при якому рідинний місток перестає утворюватися, стає в кілька разів менше ніж у статичному стані.

## **EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE CONDITIONS OF FORMATION OF A NECK OF FLUID BETWEEN THE PARTICLES OF GRANULAR LAYER DURING DEHYDRATION**

Results of model experiments to study the formation of a liquid bridge between spherical particles by reducing the free surface are presented. It is shown that distance between the particles in a dynamic state, in which the liquid bridge is ending to form is less than ones in a static state is several times.

В процессе обезвоживания сыпучего материала между частицами в зависимости от влагосодержания могут образовываться жидкие мостики (перетяжки), которые оказывают сопротивление разъединению частиц. Это сопротивление является капиллярной составляющей сил аутогезии влажного сыпучего материала, определяющих в большой степени его прочность [1]. Длина таких перетяжек зависит от количества влаги в слое, углов смачивания, пористости сыпучего материала и многих других факторов [2].

При достаточном удалении частиц друг от друга происходит разрыв перетяжки, после чего частицы становятся автономными, в результате этого расстояние между частицами растет, увеличивается пористость сыпучего материала, и влага получает лучшую возможность для выхода из пористой среды. Вследствие этого представляет интерес определить то расстояние между частицами, при котором происходит разрыв перетяжки.

В [3] было экспериментально определено расстояние между частицами сыпучего слоя, при котором существующая между ними перетяжка жидкости становится абсолютно неустойчивой по отношению к бесконечно малым возмущениям. Это дает максимальную оценку длины перетяжки сверху. Но, в процессе обезвоживания перетяжка может разрушиться намного раньше под действием конечных возмущений. Для определения влияния конечных возмущений на образование и устойчивость перетяжки и были направлены экспериментальные исследования, представленные в данной работе.

## Описание установки и схема проведения экспериментов

При проведении экспериментов, частицы сыпучей среды моделировались стеклянными шариками диаметром  $1,1 \cdot 10^{-2}$  м. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода.

Шарики были приклеены к двум металлическим стержням, расстояние между которыми можно было изменять с помощью микрометрического винта. Вся эта конструкция закреплялась на пластиковой емкости с жидкостью. В емкости имелся регулируемый сливной кран. По сравнению с [3] фотосъемка была заменена видеосъемкой. При этом разрешение уменьшилось до  $640 \times 480$ , что значительно уступает разрешению фотографий, но появилась возможность фиксировать картину изучаемого процесса через  $1/30$  секунды, что важно для изучения динамики процесса.

Перед каждым экспериментом расстояние между шариками устанавливалось при помощи калиброванных щупов с точностью  $0,5 \cdot 10^{-4}$  м и фиксировалось. В процессе каждой серии опытов расстояние оставалось неизменным. Переменным параметром являлась скорость опускания свободной поверхности жидкости

Схема проведения экспериментов была следующая. Емкость заполнялась водой до уровня, который выбирался таким, чтобы вода полностью покрывала оба шарика с небольшим запасом. Затем с помощью вентиля на сливном трубопроводе устанавливалась необходимая скорость опускания свободной поверхности воды и включалась видеосъемка. После проведения экспериментов, полученные видеофайлы переносились на компьютер, раскладывались на кадры, которые затем анализировались.

### Результаты экспериментов

Было проведено несколько серий экспериментов при различных расстояниях между шариками и различных скоростях опускания свободной поверхности жидкости.

На рисунке 1 приведены покадровые снимки одного наиболее типичного эксперимента с образованием устойчивой перетяжки между шариками. Расстояние между шариками в этом эксперименте  $0,14 \cdot 10^{-3}$  м, а скорость опускания свободной поверхности  $0,38 \cdot 10^{-3}$  м/с.

Для сравнения, на рисунке 2 показаны кадры другого эксперимента, в котором перетяжки не образуются. Здесь расстояние между шариками  $0,7 \cdot 10^{-3}$  м, а скорость  $0,23 \cdot 10^{-3}$  м/с.

Из представленных фотографий видно, что, по мере опускания уровня жидкости, в пространстве между шариками, вследствие действия капиллярных сил, ее свободная поверхность начинает искривляться. Постепенно формируется мениск сложной пространственной формы.

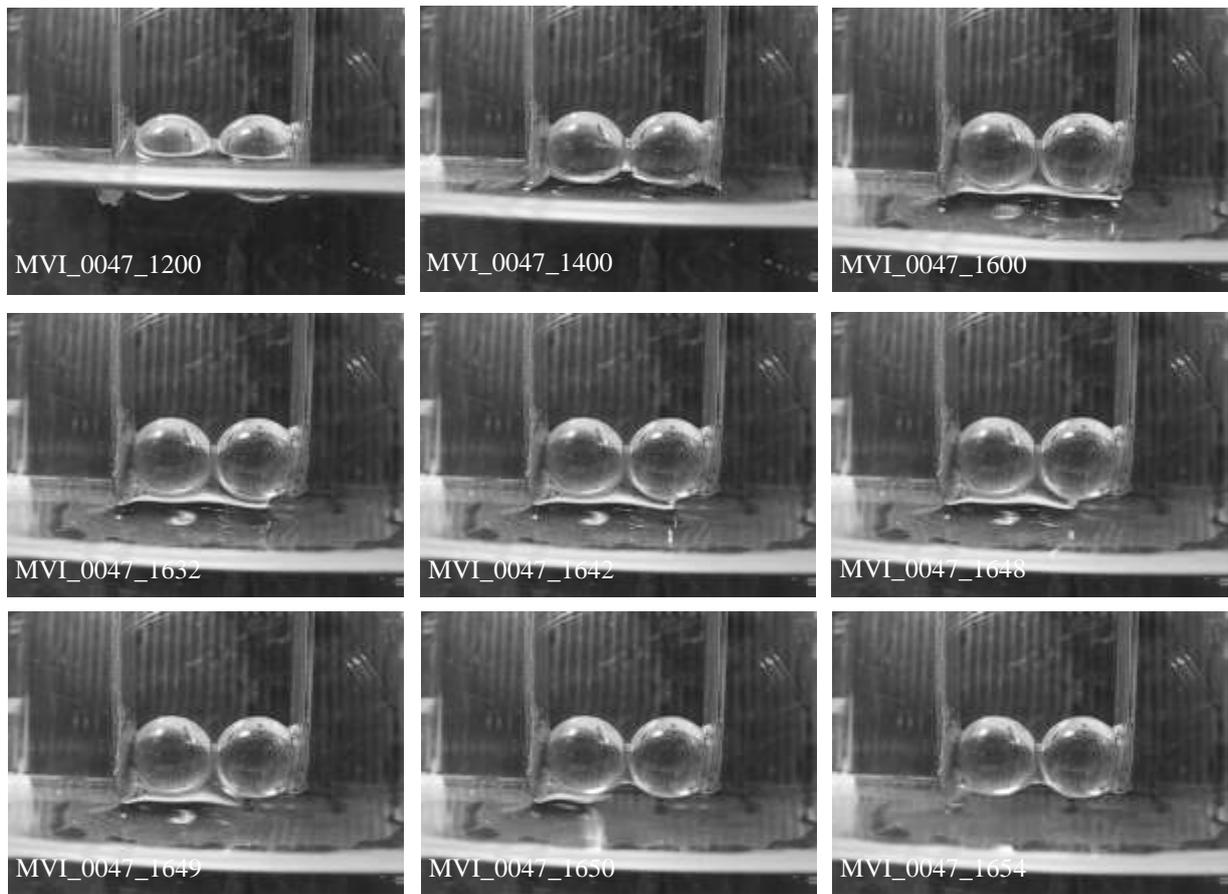


Рис. 1 – Визуализация процесса образования перетяжки

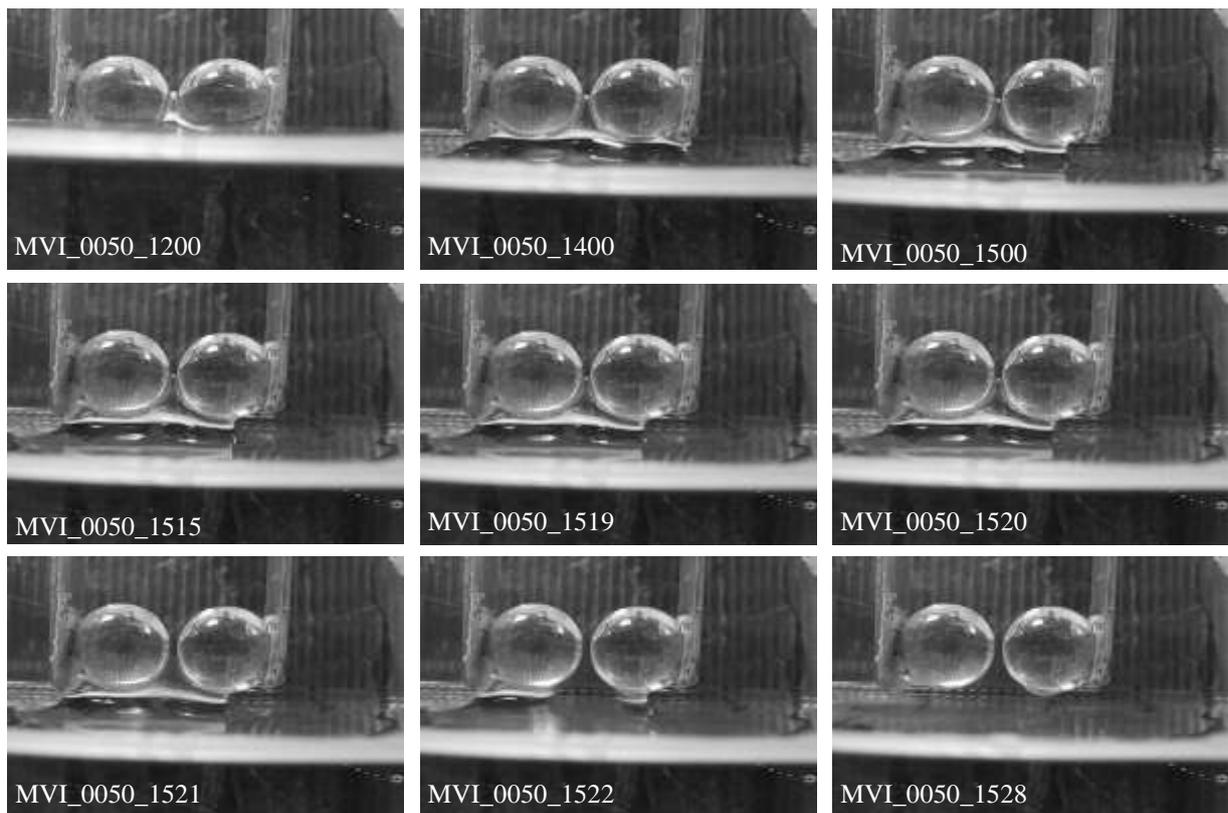


Рис. 2 – Визуализация процесса разрушения перетяжки

Так как уровень жидкости все время понижается, ее масса, возвышающаяся над свободной поверхностью, увеличивается, и для сохранения баланса между капиллярными и гравитационными силами мениск постепенно сползает с поверхности шариков вниз в направлении меньшего расстояния между ограничивающими поверхностями.

Когда уровень жидкости падает до такой степени, что приближается к нижнему краю шариков, капиллярные силы начинают проявлять себя и в этой области. На границе поверхности шарика в нижней части и свободной поверхности жидкости начинает формироваться еще один – нижний мениск. Развиваемые этим мениском капиллярные силы также как и вес жидкости противодействуют капиллярным силам мениска в верхней части боковой поверхности шариков.

При этом геометрическая форма поверхностей твердых тел и направленное вниз движение свободной поверхности придают изучаемому процессу ряд особенностей. С одной стороны, опускание уровня жидкости уменьшает кривизну нижнего мениска и ослабляет капиллярные силы. С другой стороны, когда жидкость сползает по внешней части поверхности шариков к их центру кривизна нижнего мениска должна увеличиваться. И, соответственно, должны увеличиваться капиллярные силы. В верхней части шариков с опусканием уровня жидкости кривизна мениска также увеличивается и его удерживающая способность возрастает.

Но это все справедливо до определенного момента. Для верхнего мениска этот момент наступает, когда мениск опускается до уровня горизонтальной линии, соединяющей центры шариков. Для нижнего – до уровня точки, лежащей на пересечении поверхности шарика с вертикальной линией, проходящей через его центр. На этих уровнях, которые можно условно назвать критическими, действие капиллярных сил максимально.

После прохождения этих критических уровней все меняется. В верхней части расстояние между шариками начинает резко увеличиваться, а капиллярные силы, соответственно, также резко ослабевать. В нижней части, также увеличивается расстояние между свободной поверхностью жидкости и поверхностью шарика. Здесь это еще должно усугубляться опусканием уровня жидкости. Из рассмотрения фотографий видно, что динамика исследуемого процесса по мере приближения к критическим уровням постепенно возрастает. Сначала все развивается достаточно медленно и можно ограничиться выборкой через 200 кадров. Затем промежутки между выборками приходится уменьшать и в конце рассматривать каждый кадр. После достижения критического уровня обрушение мениска происходит настолько быстро, что весь процесс фактически завершается в промежуток времени между двумя последовательными кадрами. Так, например, на рис. 1 на кадре 1648 перетяжка еще не образовалась и существует сплошность жидкости, на кадре 1649 видно, что нижний критический уровень уже пройден и мениск начал разрушаться, а на кадре 1650 перетяжка уже полностью сформирована.

Для случая, когда первым достигается критический уровень для верхнего мениска, картина аналогична. Этот случай представлен на рис. 2. Здесь рассто-

яние между шариками превышает критическое и перетяжка не образуется. Сначала процесс развивается полностью аналогично описанному выше, и выборка осуществляется через 200 кадров. Затем приходится сужать интервал времени и в конце переходить к анализу последовательных кадров. На рис. 2 на кадре 1519 мениск еще достаточно устойчив и находится примерно на линии, соединяющей центры шариков. На кадре 1520 мениск еще отчетливо видно, но находится ниже критического уровня. Наконец, на кадре 1521 мениск уже полностью обрушен, и вся жидкость слилась в основной объем.

В целом, из рассмотрения фотографий на рис. 1 – 2, следует, что процесс образования перетяжки жидкости между шариками обусловлен противодействием, с одной стороны, силы поверхностного натяжения верхнего мениска, а, с другой стороны, совместным действием силы поверхностного натяжения нижнего мениска и веса массы жидкости, заключенной между менисками. Если расстояние между шариками не превышает определенного значения, то образующийся между ними мениск способен преодолеть вес столба жидкости и капиллярные силы, развиваемые нижним мениском. В этом случае жидкость разрывается по нижнему мениску и образуется перетяжка. С увеличением расстояния баланс сил изменяется. Теперь силы поверхностного натяжения жидкости между телами уже недостаточно для преодоления двух других сил, обрушивается верхний мениск, разрыва поверхности не происходит и перетяжка не образуется.

В опытах с еще большим расстоянием между шариками картина немного меняется. Расстояние между шариками настолько велико, что, соответственно, действие капиллярных сил мало и перетяжка обрушивается еще до того, как начинает образовываться нижний мениск. В целом это укладывается в описанную выше схему образования и разрушения перетяжки.

Исследование влияния скорости опускания свободной поверхности на процесс образования перетяжки показало, что в диапазоне от  $0,04 \cdot 10^{-3}$  м/с до  $2,66 \cdot 10^{-3}$  м/с скорость не влияет на изучаемый процесс. Не было обнаружено никакого заметного влияния скорости на механизм образования перетяжки.

Анализ данных всех экспериментов показал, что максимальное расстояние между двумя частицами сферической формы, при котором в процессе обезвоживания между ними образуется жидкая перетяжка, находится в диапазоне величин между  $0,65 \cdot 10^{-3}$  м и  $0,7 \cdot 10^{-3}$  м. При меньшем значении перетяжка всегда образуется, а при большем не образуется никогда. Естественно, полученные значения относятся к конкретным экспериментам. В частности, это касается материала шариков и свойств жидкости. В описываемых экспериментах это стекло и дистиллированная вода. При других комбинациях приведенные цифры могут измениться.

В процессе проведения экспериментов выяснилось, что поверхность раздела вокруг шариков имеет достаточно сложную седловидную форму.

При сравнении результатов экспериментов по устойчивости перетяжки в стационарном состоянии [3], с результатами настоящих экспериментов по образованию перетяжки при опускании свободной поверхности, оказалось, что расстояние между частицами, при котором перетяжка теряет устойчивость, в не-

сколько раз превышает максимальное расстояние образования перетяжки при опускании уровня жидкости. В работе [3] максимальное расстояние между шариками было приблизительно равно  $2,6 \cdot 10^{-3}$  м. Получается, что в процессе опускания уровня свободной поверхности перетяжки будут образовываться, в случае если расстояние между частицами не превышает  $0,65 \cdot 10^{-3}$  м, а чтобы разрушить впоследствии эти образовавшиеся перетяжки частицы нужно раздвинуть на еще на четырехкратное расстояние.

Из результатов проведенных экспериментов можно сделать заключение, что для уменьшения остаточной влаги процесс обезвоживания нужно организовать так, чтобы максимально не допускать образования перетяжек еще на стадии гравитационного опускания жидкости в пористом слое. Для этого внешние возмущающие воздействия необходимо прикладывать с самого начала обезвоживания сыпучего слоя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зимон, А. Д. Аутогезия сыпучих материалов / А. Д. Зимон, Е. И. Андрианов. – М.: Металлургия, 1978. – 288 с.
2. Бейлин, М. И. Теоретические основы процессов обезвоживания углей / М. И. Бейлин. – М.: Недра, 1969. – 240 с.
3. Елисеев, В. И. Экспериментальное исследование перетяжки жидкости между двумя сферическими частицами / В. И. Елисеев, В. И. Луценко, Н. П. Анфимова // Дисперсные системы: XXIV науч. конф. стран СНГ, 20-24 сентября 2010 г. / Одесский нац. ун-т им. И. И. Мечникова. – Одесса: Астропринт, 2010. – С. 200-201.

Кандидаты техн. наук Т.В. Бунько,  
И.Е. Кокоулин  
(ИГТМ НАН Украины),  
д-р техн. наук Б.В. Бокий  
(ПАО «Шахта им. Засядько»,  
канд. техн. наук И.А. Ященко  
(Минэнергоуголь Украины)

## **КЛАССИФИКАЦИИ ТЕОРИЙ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ В НОРМАЛЬНЫХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

Запропонована класифікація теорій і методів розрахунку аеродинамічних параметрів шахтних вентиляційних систем, що вперше включає теорію розрахунку вентиляційних систем з невизначеною структурою і аеродинамічними параметрами

## **CLASSIFICATIONS OF THEORIES AND METHODS OF CALCULATION OF VENTILATION SYSTEMS IN NORMAL AND ACCIDENT REGIMES OF COAL MINES**

Classification of theories of methods of calculation of aerodynamic parameters of the mine ventilation systems, first including the theory of calculation of the ventilation systems with an indefinite structure and aerodynamic parameters, is offered

Для задач проектирования и перспективного планирования вентиляции угольных шахт характерны следующие особенности [1-5]:

1. Многовариантность решений (каждая задача имеет различные варианты, отличающиеся друг от друга экономическими показателями, расходуемыми ресурсами, достигаемым экономическим эффектом).

2. Наличие и использование большого количества критериев оптимальности.

Постановка задачи проектирования и перспективного планирования объединяет характеристический критерий, множество независимых переменных и математическую модель (ММ; мы применяем иногда термин «имитационная модель» (ИМ), когда это относится непосредственно к компьютерному моделированию), отражающие взаимосвязь этих переменных [6-12].

На рис. 1 обобщенно изображен процесс оптимизации структуры и аэродинамических параметров шахтной вентиляционной системы (ШВС) с использованием ее ММ на ПЭВМ (без непосредственного экспериментирования с системой проветривания). [13].

Блок 1 представляет собой реальную ШВС до проведения оптимизационных расчетов. Переход к блоку 2 отражает переход к построению ее ММ, что является исходным материалом для структурной и параметрической оптимизации ШВС. Собственно ММ строится в блоке 2. Затем с применением оптимизационных методов решается необходимая оптимизационная задача; результатом ее решения является блок 3, содержащий, по сравнению с блоком 2, новые элементы, более совершенные по выбранному критерию оптимизации.