

ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНОЙ СМЕСИ В ПОДЪЁМНОЙ ТРУБЕ ЭРЛИФТА НЕТРАДИЦИОННОГО СЕЧЕНИЯ

Малеев В.Б., канд. техн. наук, доц., Удовенко С.А., аспирант,
Донецкий национальный технический университет

Проанализировано влияние квадратного сечения подъемной трубы эрлифта на движение газожидкостной смеси и изменение касательного напряжения трения при различных режимах её течения.

При сравнительно простом устройстве эрлифту присущ очень сложный рабочий процесс подъёма жидкости. Движение газожидкостной смеси в подъемной трубе эрлифта происходит за счёт искусственного изменения плотности смеси, которое осуществляется при подаче сжатого воздуха в смесительное устройство эрлифта и последующего расширения пузырьков воздуха в процессе совместного движения с жидкостью вверх по подъемной трубе. В процессе подъёма пузырьков воздуха происходит постепенная передача энергии от менее плотной среды (воздуха) к более плотной (жидкости) за счёт снижения давления столба жидкости на пузырьки воздуха. При этом сжатый воздух не растворяется в жидкости, а движется в виде пузырей различного объёма в восходящем направлении.

Исследованиями ряда авторов [1,2] установлено, что на пузырь газа или пара, всплывающий в объёме жидкости значительного поперечного сечения действует подъемная сила, вызываемая градиентом давления в направлении движения пузыря, сила сопротивления окружающей пузырь массы жидкости и сила поверхностного натяжения. Последняя стремится придать пузырю шарообразную форму.

Исследования, направленные на изучение движения пузырьков воздуха в столбе жидкости при различных диаметрах пузырьков, получаемых при разной скорости вдува воздуха, дали многочисленные данные, анализируя которые можно установить следующее: в случае круглого отверстия диаметром до 0.4 мм пузырьки имеют практически сферическую форму и после начального ускорения в момент отрыва поднимаются вверх с постоянной скоростью; при диаметре отверстия до 4 мм образуются также сферические пузырьки, однако, при отрыве быстро принимают эллипсоидную форму, причём большая ось ориентирована в горизонтальном направлении, при этом пу-

зырьки поднимаются вверх, совершая зигзагообразное движение; когда диаметр отверстия превышает 4 мм, процесс образования пузырьков становится нестабильным при этом они иногда принимают блюдцеобразную форму, а чаще оказываются несимметричными; когда отношение диаметра пузырька к диаметру столба жидкости превышает 0.75, пузырьки принимают цилиндрическую форму с оживальной головной частью и плоским срезом сзади.

При работе эрлифта подача сжатого воздуха осуществляется по воздухоподающему трубопроводу, диаметр которого как правило превышает 4 мм. Поэтому при движении пузырьков будет наблюдаться их зигзагообразное движение. Вследствие воздействия давлений разной величины по окружности пузыря последний деформируется. При этом, чем больше объём пузыря, тем больше его форма отличается от шаровой, так как снижается влияние силы поверхностного натяжения. Она становится малой по сравнению с другими двумя действующими на пузырь силами со стороны жидкой фазы. Так как подъёмная сила и сила сопротивления движению пузыря действуют в противоположных направлениях, то он начинает сплющиваться. Причём пузырь сплющивается в плоскости, нормальной направлению его движения, увеличивая силу сопротивления. Это приводит к снижению скорости всплытия пузыря и, при достижении ею какого-то минимального значения, изменению направления его движения на 90° , при котором уменьшается площадь его сечения, нормальная новому направлению движения. В новом направлении из-за снижения силы сопротивления опять возрастает влияние силы поверхностного натяжения, и пузырь снова стремится принять шарообразную форму, которая в дальнейшем, из-за отмеченных выше причин, опять начинает переходить в сплюснутую. Таким образом пузырь всё время движется с переменной скоростью, изменяя свою траекторию. В работе [3] отмечено, что при применении ограниченного круглого сечения подъёмной трубы и групповом движении воздушных пузырей такое изменение их скоростей и траекторий приводит к колебательному процессу и возникновению вращательного движения газожидкостной смеси на отдельных участках подъёмной трубы эрлифта. При этом наблюдается отбрасывание к стенкам трубы жидкой фазы смеси и объединение пузырьков воздуха вдоль оси подъёмной трубы. В случае применения квадратного сечения подъёмной трубы эрлифта, колебательный процесс движения газожидкостной смеси сохраняется, но прекращается её вращательное движение, вследствие отражения

воздушных пузырей навстречу друг другу от противоположных плоских стенок.

Розенбергом [4] было установлено, что пузыри сохраняют сферическую форму при значениях числа Рейнольдса $Re < 400$. Для трубы круглого сечения вращательное движение смеси будет начинаться при $Re \geq 400$, когда форма пузырьков начнёт изменяться на эллипсоидную. Зная предельное число Рейнольдса $Re_{np} = 400$ можно определить скорость v_{np} движения пузырей воздуха, при которой будет начинаться вращение газожидкостной смеси в подъёмной трубе эрлифта:

$$v_{np} = \frac{Re_{np} \cdot \mu}{2 \cdot \rho \cdot a}, \quad (1)$$

где Re_{np} – число Рейнольдса, при котором начинается изменение формы пузыря в эллипсоидную; μ – динамическая вязкость жидкости; ρ – плотность жидкости; $2a$ – диаметр пузырька.

При скоростях всплывания пузырьков $v > v_{np}$ смесь будет совершать вращательное движение, которое значительно увеличивает потери напора в подъёмной трубе эрлифта. Уменьшить эти потери, а значит увеличить КПД эрлифтной установки можно, заменив круглую форму сечения подъёмной трубы на квадратную.

В большинстве случаев эрлифтные установки используются для откачки жидкости с включением твёрдых частиц. Поэтому качественное смешивание трёх фаз поднимаемой смеси положительно сказывается на производительности эрлифта. Для оценки влияния формы сечения подъёмной трубы на смешивание рассмотрим отношение коэффициента диффузии частицы к коэффициенту турбулентной диффузии жидкости:

$$\frac{D_p}{D} = 1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_E^2} \cdot \left(\frac{3K^2}{K+2} \right) + \Theta \left(\frac{1}{\lambda_E^4} \right), \quad (2)$$

λ - лагранжев микромасштаб турбулентности;

λ_E - эйлеров микромасштаб турбулентности;

K - отношение времени передачи импульса частицы при столкновении к промежутку времени, в течение которого элемент жидкости остаётся в области корреляции скоростей.

Коэффициент диффузии частицы пропорционален интегральному масштабу корреляции приобретаемых скоростей. При конечном значении λ/λ_E твёрдая частица с $K \neq 0$ не будет следовать за первым же элементом жидкости с которой она встречается, но она будет взаимодействовать с другими элементами жидкости.

При работе эрлифтной установки в подъёмной трубе устанавливается турбулентный режим течения смеси. Для этого режима был проведён ряд экспериментальных исследований [2] по определению коэффициента диффузии. Результаты экспериментальных данных показали, что коэффициент диффузии, при применении в экспериментальной установке трубы квадратного сечения, превышал значения коэффициентов диффузии, полученных в случае применения трубы круглого сечения. При сравнении результатов, представленных работ, оказалось, что в квадратном канале достигается большая степень перемешивания, чем в трубах круглого сечения. Это даёт основание говорить о возможности применения трубы квадратного сечения.

В работах ряда авторов [5,6] отмечено, что повышение производительности эрлифтной установки можно достигнуть за счёт перевода эрлифтной установки на периодический (снарядный) режим работы. При этом отмечается, что из-за снижения уровня откачиваемой жидкости (что характерно при работе короткого эрлифта с малой глубиной погружения) увеличивается удельный расход воздуха и снижается его рабочее давление. Поэтому применение периодического эрлифта может повысить эффективность работы эрлифтной установки. В работе [7] приведён ряд экспериментальных данных по исследованию напряжения трения τ при снарядном, пузырьковом и дисперсно-кольцевом режимах течения двухфазной смеси в вертикальных трубах.

Известно, что при установившемся движении одномерного течения жидкости в вертикальной трубе уравнение движения имеет вид:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{4 \cdot \tau}{D} + g \cdot [\rho' \cdot (1 - \varphi) + \rho'' \cdot \varphi], \quad (3)$$

где τ - касательное напряжение трения; D - диаметр трубопровода; ρ' - плотность жидкой фазы смеси; ρ'' - плотность газообразной фазы смеси; φ - истинное газосодержание.

Сопротивление движению смеси прямопропорционально перепаду давления, а следовательно и касательному напряжению трения.

Анализируя экспериментальные данные [7], можно сделать вывод, что при истинном газосодержании $\varphi < 0.8$ и приведенной скорости движения жидкой фазы до 0,5 м/с величина напряжения трения при снарядном режиме течения величина напряжения трения в 1.5 – 2 раза меньше, чем при пузырьковом режиме течения. При приведенных скоростях жидкости от 1.5 до 4 м/с и $\varphi < 0.5$ величина напряжения трения становится практически одинаковой. Следовательно, применение снарядного режима работы эрлифтной установки не приведёт к потерям, обусловленным сопротивлением движению смеси в подъёмной трубе. При проведении экспериментов для получения разных режимов течения использовались различные способы подачи воздуха. При подаче через специальное сопло даже при малом объёмном газосодержании β наблюдался снарядный режим течения. При подаче газа через пористый цилиндр реализовался пузырьковый и снарядный режим течения. Анализируя полученные результаты, можно отметить, что снарядный режим во втором случае реализовался при больших скоростях воздуха и значительном объёмном газосодержании, что привело бы к дополнительным потерям в эрлифтной установке. При этом значения касательных напряжений близки по своей величине. Таким образом, применяя конструкцию смесителя, которая позволяла бы обеспечить необходимую подачу сжатого воздуха за счёт накопления его объёма, можно осуществить снарядный режим работы эрлифта при любых подачах воздуха. Наряду с применением подъёмной трубы квадратного сечения это может обеспечить снижение затрат энергии и значительно повысить производительность установки при высоком значении КПД. Для выявления видов гидравлических и объёмных потерь энергии необходимо провести дальнейшие исследования.

Список источников.

1. Кутателадзе С.С. Гидродинамика газожидкостных систем. -М.: Энергия, 1976.
2. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. -М.: Мир, 1971.
3. Малыгин С.С., Малеев В.Б. К вопросу обоснования рациональной формы сечения подъёмной трубы короткого эрлифта. / В кн. "Наукові праці Донецького державного технічного університету". Випуск 16. Серія: Гірничо-електромеханічна. Донецьк, 2000. с.198-204.
4. Rosenberg V., David Taylor Model, Basin Rept. p.727, 1953.
5. Белов И.Г. Теория и практика периодического эрлифта., -М.: Недра, 1975.
6. Шоу С.Ф. Теория и практика газлифта. -М.: Гостоптехиздат, 1948.
7. Экспериментальное исследование пристенных турбулентных течений. / Кутателадзе С.С., Миронов Б.П. и др., Новосибирск, Наука, 1975.