

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА  
ЭРЛИФТА

А.С. Глушко, студент

А. П. Кононенко, д. т. н., профессор

Донецкий национальный технический университет

*Разнообразие условий практического применения эрлифтов во многих отраслях промышленности вызвало потребность в разработке нескольких методов их расчета. В данной статье приведены результаты анализа существующих математических моделей рабочего процесса эрлифта, обоснована потребность в усовершенствовании методов расчета газожидкостных подъемников.*

Для характеристики движения двухфазных потоков в вертикальных трубах используют осредненные во времени и пространстве параметры. Используемые осредненные параметры обычно разделяют на расходные и истинные.

Основными расходными параметрами двухфазного потока являются:  $M_{ж}$  и  $M_г$  - массовые расходы жидкости и газа;  $Q_{ж}$  и  $Q_г$  - объемные расходы жидкости и газа;  $v_{ж}$  и  $v_г$  - средние скорости жидкости и газа;  $X$  - массовое расходное газосодержание потока;  $\beta$  - объемное расходное газосодержание потока;  $\rho_\beta$  - средняя расходная плотность потока.

Истинные параметры двухфазного потока:  $\varphi$  - истинное объемное газосодержание;  $w_г$  - истинная скорость газа;  $w_{ж}$  - истинная скорость жидкости;  $w_{отн}$  - относительная скорость фаз;  $\rho_c$  - истинная плотность смеси.

Математическое моделирование и количественный анализ рабочего процесса эрлифта базируется на использовании фундаментальных уравнений сохранения – массы и количества движения.

В настоящее время создание единой теоретической модели для нескольких структур газожидкостной смеси не представляется возможным из-за сложности процессов.

Простейшей моделью газожидкостного потока в трубе является гомогенная, введенная Г. Лоренцом. В данной модели относительная скорость газа и жидкости принимается равной нулю, смесь рассматривается как однофазная жидкость, обладающая соответствующими реальному потоку средними свойствами, и движение смеси описывается уравнениями однофазной среды. В соответствии с гомогенной моделью:

$$\varphi = \beta; \quad v_2 = \frac{v_{жс}}{1-\beta} = \frac{v_z}{\beta}; \quad \rho_c = \rho \frac{v_{жс}}{v_c}. \quad (1)$$

К сожалению, лишь в редких случаях гомогенная модель дает результаты, достаточно близкие к реальным. Поэтому для практических расчетов эту модель используют лишь в качестве грубого приближения.

Модель раздельного течения основана на использовании уравнений неразрывности движения и энергии отдельно для каждой фазы. Получение такого решения не представляется возможным и реализация модели раздельного течения сводится к эмпирическому (или полуэмпирическому) получению критериального уравнения для определения истинного газосодержания

$$\varphi = \varphi[\beta, Fr_c, Re_c, We, \bar{\rho}, \bar{\mu}, \dots], \quad (2)$$

где  $Fr_c$  - критерий Фруда;

$Re_c$  - критерий Рейнольдса;

$We$  - критерий Вебера;

$\bar{\rho}$  - относительная плотность;

$\bar{\mu}$  - относительная динамическая вязкость.

При этом далеко не все критерии, входящие в вышеприведенное уравнение оказывают существенное влияние на величину  $\varphi$ .

Известен целый ряд критериальных уравнений для определения  $\varphi$ , однако все они, как правило, позволяют получить достоверные результаты лишь в области параметров потока, для которых они получены.

Более универсальной является модель, аналитически учитывающая взаимное скольжение газа и жидкости, названная Г. Уоллисом моделью дрейфа. Данная модель представляет собой модель раздельного течения, в которой исследуется не движение отдельных частиц, а их относительное движение. Теория потока дрейфа широко используется при исследовании пузырьковых, снарядных и дисперсных течений газожидкостных систем. В общем виде уравнение потока дрейфа имеет вид:

$$\varphi = \frac{v_z}{C_1(v_z + v_{жс}) + v^*}, \quad (3)$$

где  $C_1$  - коэффициент, как правило принимают  $C_1 = 1,2$ ;

$v^*$  - скорость потока дрейфа;

$$v^* = C_2 v_n, \quad (4)$$

здесь  $v_n$  - скорость подъема одиночного пузырька газа в жидкости;

$C_2$  - коэффициент, характеризующий взаимодействие пузырьков между собой или стенками трубопровода.

Преимуществом модели потока дрейфа является то, что результаты расчета достаточно хорошо согласуются не только с

данными для движения газожидкостного потока, но и для непроточного барботажного слоя ( $v_{ж} = 0$ ).

Наряду с вышеизложенными общими моделями процесса движения двухфазных потоков для конкретных условий разработан ряд частных теоретических и эмпирических моделей, основывающихся на отдельных сторонах взаимодействия газа и жидкости в подъемной трубе эрлифта: модель, основанная на учете «подъемной силы газа» А. П. Крылова, энергетическая модель Верлюиса, модель «негерметичного поршня» и ряд других.

Наиболее часто используется гомогенная модель Г. Лоренца, в которой уравнение подачи эрлифта выглядит следующим образом:

$$Q_3 = \frac{1}{1 + q \frac{p_0}{p_0 + \rho gh/2}} \left[ \frac{h}{a_3} \left( 1 + q \frac{p_0}{p_0 + \rho gh/2} - \frac{1}{\alpha} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

где  $a_3$  - коэффициент сопротивления подъемной трубы эрлифта;

$h$  - геометрическое погружение смесителя;

$p_0$  - атмосферное давление;

$\rho$  - плотность транспортируемой среды;

$g$  - ускорение свободного падения.

Н. М. Герсеванов предложил вести расчет эрлифта по энергии, затрачиваемой на преодолении сопротивления движению пузырьков газа в жидкой среде. Предложенная методика расчета не учитывала изменение форм движения смеси в подъемной трубе эрлифта при различных режимах работы, поэтому результаты газожидкостных подъемников, работающих при больших перепадах давлений, имели значительное отклонение от практических замеров.

Метод расчета эрлифта, к авторам которого отнесены академик А. П. Германом и профессора П.П. Агрунов и В.Г. Гейер, основан на применении безразмерных характеристик. Используя уравнение Д. Бернулли для сжимаемой однородной жидкости, получены зависимости, позволяющие применять данные испытаний эрлифтов для анализа внутренних явлений в трубе эрлифта. Наиболее ценным выводом является то, что ученые указали на существование безразмерных характеристик эрлифта, главным из которых является относительное погружение эрлифта  $\alpha = h/(H + h)$  ( $H$  - высота подъема эрлифта). Относительное погружение определяет для данного диаметра подъемной трубы  $D$  расход воздуха  $Q_6$  и подачу эрлифта  $Q_3$ , что широко использовалось в дальнейшем и в других работах.

Наибольшее распространение получила методика профессора В.Г. Гейера, во многом базировавшаяся на выполненных им ранее исследованиях. В основу расчета положен баланс мощностей потока жидкости и газа в подъемнике при принятой относительной скорости

фаз, равной 0,3 м/с. Основное уравнение, полученное ученым, имеет вид:

$$Q_3 = 0,125 D^{2.5} \sqrt{\frac{23q \cdot \log\left(\frac{h}{10} + 1\right) - H}{(q+1)^2 \frac{D^5}{D_6^4} + 0,022(H+h) + 23 \frac{q}{h} \cdot \log\left(\frac{h}{10} + 1\right)}}, \quad (6)$$

где  $D_6$  - диаметр выходного торца подъемной трубы;

$q$  - удельный расход воздуха.

Обозначив выражение под корнем, умноженное на 0,125, через коэффициент подачи  $C$ , уравнение примет вид

$$Q_3 = C \cdot D^{2.5}. \quad (7)$$

Расход воздуха вычисляется по выражению

$$Q_6 = q \cdot Q_3, \quad (8)$$

Значения коэффициента подачи эрлифта и удельного расхода воздуха определяются по эмпирическим зависимостям  $C = f(\alpha)$  и  $q = f(\alpha)$ .

Правомерность разработанной методики подтверждена многими эффективно работающими эрлифтными установками. Многочисленные теоретические и экспериментальные работы ученых школы профессора В.Г. Гейера позволили разработать метод расчета эрлифта в оптимальном режиме работы (при максимальном КПД).

К недостаткам разработанной математической модели эрлифта следует отнести принятую гомогенную физическую модель и постоянство значений коэффициентов сопротивления  $\lambda$  в оптимальном режиме работы эрлифта для всех реализуемых в подъемнике структур двухфазных потоков. Различные структуры водовоздушных смесей, в том числе изменяющиеся по высоте подъемных труб, определяются режимами работы газожидкостных подъемников.

Однако существующие методики количественной оценки гидродинамических параметров газожидкостных потоков в подъемнике требуют уточнения, что влечет за собой необходимость разработки адекватных физических и математических моделей рабочего процесса эрлифта.

Список источников.

1. Папаяни Ф.А., Козыряцкий Л.Н., Пашенко В.С., Кононенко А.П. Энциклопедия эрлифтов. М.: Информсвязиздат, 1995. – 592 с.

2. Кононенко А.П. Теория и рабочий процесс эрлифтов: Диссертация д. т. н.: 05.05.17. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 565 с.

3. Эрлифтные установки: Учебное пособие/ Гейер В.Г., Козыряцкий Л.Н., Пашенко В.С., Ан тонов Я.К. – Донецк: ДПИ, 1982. – 64 с.