

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ПОДОБИЯ ШАХТНЫХ КОРОТКИХ ЭРЛИФТНЫХ УСТАНОВОК

Малеев В.Б., докт.техн. наук, проф.,
Малыгин С.С., канд.техн. наук., Удовенко С.А., аспирант

Донецкий национальный технический университет

Определены критерии подобия для эрлифтов с произвольным сечением подъемной трубы.

The criteria of similarity for airlifts with any section of an elevating pipe are determined.

Проблема и ее связь с научными или практическими задачами. Несмотря на то, что эрлифты имеют сравнительно простую конструкцию, они отличаются значительной сложностью происходящих в них физических процессов, вызванных взаимодействием двух (жидкость и газ), а часто и трех (жидкость, газ и твердые частицы) разнородных сред. В связи с этим до настоящего времени мы не имеем достаточно точных уравнений для описания движения газожидкостных смесей в трубопроводах и в эрлифтах в частности. Имеющиеся же в настоящее время общие уравнения движения газожидкостных смесей по трубам, как правило, очень сложны [1-3] и их применение при решении конкретных задач приводит к невозможности решения последних. Поэтому при исследовании эрлифтов и расчете их параметров широко используют экспериментальные данные, которые, как правило, получают при проведении экспериментов на моделях, так как натурные эрлифтные установки имеют значительные размеры и стоимость. В связи с этим до начала проектирования установок необходимо исключить ошибки расчета, что может быть достигнуто точностью моделирования. От соответствия модели натуре зависит также надежность эксплуатации эрлифтных установок при заданных параметрах. Надежность моделирования любого процесса или установки может быть достигнута только при наличии теории подобия, позволяющей правильно выбрать параметры модели и натуре.

Анализ исследований и публикаций. Условия подобия эрлифтов определялись В.С. Костандой, Ф.А. Папаяни, А.П. Кононенко, В.С. Пашенко, Л.Н. Козыряцким [4-6].

В.С. Костанда установил условие подобия эрлифтов не на основании теории размерностей, а на основании анализа ряда экспериментов и подбора нужного сочетания критериев Фруда и Эйлера, дающего по его мнению, основной и единственный критерий подобия эрлифтов – относительное погружение α :

$$Fr \cdot Eu = \frac{\rho_{ж} g h}{\rho_{ж} g l} = \alpha .$$

Дальнейшие исследования эрлифтов показали, что условия подобия только при $\alpha = idem$ не всегда выполняются.

Л.Н. Козыряцкий и другие авторы при определении критериев подобия исходили из теории размерностей. Ими были получены условия подобия, которые имеют вид $\alpha = idem$, $q_n = idem$, где q_n – удельный расход воздуха отнесенный к середине подъемной трубы эрлифта. Однако ими был допущен ряд неточностей, и, как показали результаты проверки экспериментальных данных по ряду эрлифтов имеющих одинаковые относительные погружения α , второе условие подобия $q_n = idem$ соблюдается только при незначительных отклонениях погружений смесителей. То есть, $q_n = idem$ при $\alpha = idem$ соблюдается только в частных случаях.

Постановка задачи. Таким образом, результаты рассмотренных работ нельзя считать исчерпывающими. К тому же данные работы были посвящены только эрлифтам с круглым сечением подъемной трубы и не учитывали ряд величин при определении критериев подобия: форму поперечного сечения подъемной трубы, подачу эрлифта, перепад давления в подъемной трубе между смесителем и воздухоотделителем, плотность перекачиваемой жидкости.

Целью настоящей статьи является определение критериев подобия для эрлифтов с произвольным сечением подъемной трубы.

Изложение материала и результаты. Согласно третьей теореме подобия, предложенной М.В. Кирпичевым и А.А. Гухманом [7], необходимыми и достаточными условиями для обеспечения подобия являются соответствие сходственных параметров, входящих в условия однозначности, и равенство определяющих критериев подобия, содержащих условия однозначности.

Эрлифтная установка рассматривается нами как сложная система, состоящая из трех подсистем: 1) всасывающего устройства

(всасывающего трубопровода); 2) собственно эрлифта; 3) воздухопровода с генератором.

При рассмотрении подобия сложных систем необходимо учесть и дополнительное положение к третьей теореме подобия [7], в которой отмечено, что подобие сложных систем, состоящих из нескольких подсистем, соответственно подобных в отдельности, обеспечивается подобием всех сходственных элементов, являющимися общими для подсистем.

Общим элементом для входящих в эрлифт подсистем принимаем смеситель, который соединяет всасывающую трубу, воздухопровод и подъемную трубу. Следовательно, для установления условий подобия эрлифтных установок необходимо установить подобие их подсистем.

Подобие всасывающих устройств и воздухопроводов эрлифтных установок нет необходимости рассматривать, так как на сегодняшний день эти вопросы довольно подробно рассмотрены и освещены в работах В.М. Моргунова [8] и Н.Г. Логвинова [9]. Следовательно, при определении условий подобия эрлифтных установок можно использовать результаты, которые были ими получены.

Поэтому рассмотрим подобие собственно эрлифтов, так как оно было недостаточно исследовано. В связи с тем, что физическую сущность процесса движения газожидкостной смеси в подъемной трубе эрлифта очень сложно довольно точно описать уравнениями, условия подобия определим на основании экспериментального материала и теории размерностей.

Проведенный нами анализ многочисленных исследований эрлифтов имеющих самые различные параметры, позволяет определить факторы, существенные для процесса движения газожидкостной смеси в их подъемной трубе. К ним следует отнести эквивалентный по площади живого сечения диаметр подъемной трубы эрлифта - $d_э$, среднюю скорость движения газожидкостной смеси в подъемной трубе - $V_{см}$, разность плотностей жидкой и газообразной фаз ($\rho_{жс} - \rho_г$), плотность жидкой фазы - $\rho_{жс}$, длину подъемной трубы от смесителя до воздухоотделителя - l , перепад давления между смесителем и воздухоотделителем - Δp , кинематическую вязкость жидкой фазы - $\nu_{жс}$, ускорение свободного падения - g , подачу эрлифта - $Q_э$, шероховатость трубопровода - Δ и время τ . Другие факторы, которые оказывают влияние на процесс

движения газожидкостной смеси: погружение смесителя h , расход воздуха Q_2 и его плотность ρ_2 , можно определить через приведенные выше существенно влияющие факторы и не подставлять их в уравнение. Учитывая отмеченное выше, процесс движения газожидкостной смеси в подъемной трубе эрлифта в общем виде можно описать уравнением:

$$f(d_э, \rho_{жс}, v_{жс}, l, (\rho_{жс} - \rho_2), V_{см}, \Delta p, g, Q_э, \Delta, \tau) = 0 \quad (1)$$

При исследовании движения газожидкостной смеси в подъемной трубе эрлифта вопросы теплообмена можно не учитывать, так как процесс всегда является близким к изотермическому. Это обстоятельство позволяет свести рассматриваемую систему к чисто механической задаче. В качестве системы основных единиц для выражения размерностей фундаментальных переменных принимаем основные единицы системы СИ: метр – единица длины l – размерность L , килограмм – единица массы m – размерность M , секунда – единица времени t – размерность T .

Число безразмерных комплексов, характеризующих процесс, согласно второй теореме подобия (π - теореме) при общем числе величин, существенных для процесса $n = 11$ и основных единиц $m = 3$ будет равно: $r = n - m = 11 - 3 = 8$.

Количество независимых величин не может превышать число основных единиц [7] (в нашем случае трех). Следовательно, необходимо из всей совокупности величин, влияющих на процесс, выбрать три в качестве независимых. Выбор независимых величин осуществляется по условию неравенства нулю хотя бы одного определителя, составленного из показателей степени основных единиц. Порядок этого определителя не должен превышать число основных единиц, с помощью которых измеряются влияющие на исследуемый процесс величины.

Выберем в качестве независимых величины $d_э$, $\rho_{жс}$ и $V_{см}$: $[d_э] = [L^1 M^0 T^0]$, $[\rho_{жс}] = [L^{-3} M^1 T^0]$; $[V_{см}] = [L^1 M^0 T^{-1}]$. Определитель, составленный из показателей степеней основных единиц, дает основание говорить о том, что выбранные величины действительно независимы.

Пользуясь относительной системой единиц измерения, уравнение (1) запишем в виде:

$$f\left(1,1,1,\frac{[l]}{[d_{\text{э}}]^{a_1} [\rho_{\text{жс}}]^{b_1} [V_{\text{см}}]^{c_1}},\frac{[\rho_{\text{жс}} - \rho_{\text{г}}]}{[d_{\text{э}}]^{a_2} [\rho_{\text{жс}}]^{b_2} [V_{\text{см}}]^{c_2}},\right. \\ \frac{[v_{\text{жс}}]}{[d_{\text{э}}]^{a_3} [\rho_{\text{жс}}]^{b_3} [V_{\text{см}}]^{c_3}},\frac{[\Delta p]}{[d_{\text{э}}]^{a_4} [\rho_{\text{жс}}]^{b_4} [V_{\text{см}}]^{c_4}},\frac{[g]}{[d_{\text{э}}]^{a_5} [\rho_{\text{жс}}]^{b_5} [V_{\text{см}}]^{c_5}}, \\ \left.\frac{[Q_{\text{э}}]}{[d_{\text{э}}]^{a_6} [\rho_{\text{жс}}]^{b_6} [V_{\text{см}}]^{c_6}},\frac{[\Delta]}{[d_{\text{э}}]^{a_7} [\rho_{\text{жс}}]^{b_7} [V_{\text{см}}]^{c_7}},\frac{[\tau]}{[d_{\text{э}}]^{a_8} [\rho_{\text{жс}}]^{b_8} [V_{\text{см}}]^{c_8}}\right) = 0 \quad (2)$$

Определив показатели степеней при независимых переменных, получим восемь безразмерных комплексов, характеризующих процесс движения газожидкостной смеси в подъемной трубе эрлифта:

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8) = 0 \quad (3)$$

или

$$f\left(\frac{l}{d_{\text{э}}}, \frac{\rho_{\text{жс}} - \rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{жс}}}, \frac{1}{Re}, Eu, \frac{1}{Fr}, \frac{Q_{\text{с}}}{d_{\text{э}}^2 V_{\text{см}}}, \frac{\Delta}{d_{\text{э}}}, \frac{V_{\text{см}} \tau}{d_{\text{э}}}\right) = 0 \quad (4)$$

Как видно из полученного уравнения, в него входят восемь безразмерных комплексов, являющихся критериями подобия процесса движения газожидкостной смеси в эрлифтах. Моделирование по такому большому количеству критериев практически невозможно так как требования их противоречивы. Снизим количество критериев подобия за счет их комбинирования, так как любая комбинация критериев есть также критерий подобия [7].

После проведенных преобразований и комбинирования критериев подобия уравнение (4) примет следующий вид:

$$f\left(\frac{l}{d_{\text{э}}}, Ar, \frac{\alpha_{\text{э}} \cdot l \cdot \sin \beta}{d_{\text{э}}}, \frac{V'_{\text{жс}} \cdot \tau}{d_{\text{э}}}, \frac{\Delta}{d_{\text{э}}}\right) = 0 \quad (5)$$

где $\alpha_{\text{э}}$ - динамическое относительное погружение эрлифта; β - угол наклона подъемной трубы эрлифта; $V'_{\text{жс}}$ - некоторая условная средняя скорость движения жидкой фазы смеси по всему живому сечению подъемной трубы

Так как при моделировании эрлифтов необходимо всегда выполнять $\frac{l}{d_э} = idem$, то можно записать:

$$f\left(\frac{l}{d_э}, Ar, \alpha_э \sin \beta, \frac{V'_{жс} \cdot \tau}{d_э}, \frac{\Delta}{d_э}\right) = 0 \quad (6)$$

Согласно π - теореме [7] один из полученных пяти критериев подобия является зависимым и должен выполняться автоматически при выполнении остальных четырех. В качестве зависимого был принят критерий $\frac{V'_{жс} \cdot \tau}{d_э}$. Правильность выбора зависимого критерия была подтверждена экспериментально при обеспечении постоянства остальных критериев, являющихся независимыми. В данный критерий входят эквивалентный диаметр подъемной трубы эрлифта, условная средняя скорость движения жидкой фазы, характерное время, в качестве которого принимаем время движения частицы газожидкостной смеси от смесителя до выхода в воздухоотделитель.

При обеспечении равенства наклона труб натурной установки и модели к горизонту ($\beta_1 = \beta_2$) критериальное уравнение примет вид:

$$\frac{V'_{жс} \cdot \tau}{d_э} = \Phi\left(\frac{l}{d_э}, \frac{\Delta}{d_э}, \alpha_э, Ar\right) \quad (7)$$

Условия подобия запишутся как

$$\frac{l}{d_э} = idem; \quad \frac{\Delta}{d_э} = idem; \quad \alpha_э = idem; \quad Ar = idem \quad (8)$$

Выполнение первых трех условий подобия не вызывает трудности при моделировании. Для соблюдения же условия $Ar = idem$ необходимо в качестве перекачиваемой жидкости использовать жидкость с меньшей плотностью и вязкостью, по сравнению с перекачиваемой в натурной установке. Использование же одинаковой жидкости не дает при моделировании полного подобия объектов.

При практическом применении всякое подобие сложного комплексного явления, существенное в технических задачах, всегда является в какой-то степени приближенным. Приближенное подобие и связанное с ним приближенное моделирование основаны на том, что некоторые факты, оказывающие незначительное влияние на ход того или иного процесса, моделируются приближенно или не

моделируются совсем, что приводит к условному вырождению связанных с ними критериев подобия. Такое уменьшение необходимого числа критериев подобия упрощает моделирование сложных физических процессов, практически не снижая его точности. Следует только при этом, на основании теоретических или экспериментальных исследований, доказать правомерность пренебрежения тем или иным критерием подобия. В противном случае моделируемый процесс может измениться настолько, что не будет иметь ничего общего с натурой. С целью ограничения числа необходимых критериев подобия принимаем приближенное подобие к эрлифтам, перекачивающим воду и близким к ней по физическим свойствам жидкости. Для этого используем обширный экспериментальный материал по эрлифтам, накопленный в ДонНТУ.

Анализ затрат мощности в подъемных трубах эрлифтов, работающих на воде, показал, что потери мощности на преодоление гидравлических сопротивлений по длине подъемной трубы, обусловленные проявлением сил трения, как правило, не превышает (0,5...5)% от общих затрат. Поэтому соблюдение подобия сил трения в подъемных трубах подобных эрлифтов можно считать не обязательным. Это допущение приводит к вырождению критериев

$\pi_3 = \frac{1}{Re}$ и $\pi_7 = \frac{\Delta}{d_э}$. Несмотря на то, что плотность подводимого

сжатого воздуха может изменяться в широких пределах (для рассмотренных эрлифтов с глубиной погружения смесителей от 1 до 100 м), измененные значения параметрического критерия подобия

$\frac{\rho_{жс} - \rho_г}{\rho_{жс}}$ не превышает 5%. Поэтому с некоторым допущением можно

принимать критерий $\frac{\rho_{жс} - \rho_г}{\rho_{жс}} \approx 1$ и считать его постоянным для

любого эрлифта, имеющего погружение смесителей в рассмотренных пределах.

С учетом ранее осуществленной группировки критериев подобия и соблюдении при моделировании равенства углов наклона подъемной трубы модели и натурной установки условия подобия запишутся как:

$$\frac{l}{d_э} = idem, \quad \alpha_э = idem. \quad (9)$$

Выводы и направление дальнейших исследований:

1. Полученные нами критерии подобия (8), в отличие от полученных ранее, учитывают геометрические параметры эрлифтных установок и требуют подобия динамического относительного погружения, шероховатости труб и критерия Архимеда. Если при моделировании обеспечить геометрическое подобие и равенство коэффициентов местных сопротивлений смесителей, являющихся общими элементами эрлифтных систем, то при обеспечении подобия входящих в них подсистем, согласно первому дополнительному положению к третьей теории подобия будет обеспечено подобие эрлифтных установок как сложных систем.

2. При моделировании эрлифтов для решения практических задач, работающих на воде и близких к ней по физическим свойствам жидкостях, число независимых критериев подобия сокращается до двух (9) и требует соблюдения подобия отношения геометрических размеров эрлифта и динамического относительного погружения.

3. Моделирование можно осуществлять на одинаковой для природы и модели жидкости, линейный масштаб моделирования можно выбирать произвольно, соблюдая только соотношение $K_l \leq \frac{d_{\text{э}}}{0,03}$, необходимое для исключения влияния на процесс в модели сил поверхностного натяжения.

Список источников:

1. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. – М.: Энергия, 1981 – 470с.
2. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. -М.: Энергия, 1976.-295с.
3. Криль С.И. Напорные взвесенесущие потоки. – К.: Наукова думка.-1990.-158с.
4. Энциклопедия эрлифтов. / Папаяни Ф.А., Козыряцкий Л.Н., Пашенко В.С., Кононенко А.П. – М.-Д.: ДПИ, 1995.-592с.
5. Костанда В.С. К расчету эрлифтных установок. //Сб.Труды ДПИ, вып.12, Донецк,-1960,- С.46-51.
6. Козыряцкий Л.Н. Исследование и разработка уточненного расчета эрлифтных установок горной промышленности. Автореф дис. на соиск. уч.степени канд.техн.наук, Донецк, ДПИ. 1976.-20с
7. Венников В.А. Теория подобия и моделирования. - М.: Высшая школа, 1984.- 439с.
8. Моргунов В.М. Исследование узла дозирования углесосных станций гидрошахт с целью создания системы контроля и опережающей защиты. Дис. на соиск. уч.степени канд.техн наук, Донецк, ДПИ. 1978.-146с.
9. Логвинов Н.Г., Стегниенко А.П. Исследование устойчивости систем автоматического регулирования эрлифтных гидроподъемов.// Сб. Разработка месторождений полезных ископаемых.- К.: Техника, №37, 1974.-С.63-68