

снижается относительная мольная доля псевдо компонента C5+ в области давлений от начала конденсации и до остаточного давления 0,1 МПа (рис. 1, 4).

- Критическое давление псевдо компонента C5+ главным образом влияет на давление начала конденсации смеси, при увеличении критического давления увеличивается давление начала конденсации. Влияние критического давления на изменение относительной мольной доли псевдо компонента C5+ имеет место только в области высоких давлений (рис. 2, 5).

- Увеличение ацентрического фактора влечет за собой увеличение давления начала конденсации, а также снижение относительного потенциального содержания C5+ в пластовом газе в области от начала конденсации и до остаточного давления 0,1 МПа (рис. 3, 6).

Таким образом, при изменении критических параметров псевдо компонента C5+ можно изменять давление начала конденсации пластовой смеси, а также изменять потенциальное содержание C5+ в пластовом газе при снижении пластового давления. Это можно учитывать для настройки модели расчета фазового равновесия на промысловые данные, или данные лабораторных экспериментов.

Список литературы

1. Баталин, О. Ю., Брусиловский, А. И., Захаров, М. Ю. Фазовые равновесия в системах природных углеводородов. – М.: Недра, 1992.
2. Брусиловский, А. И. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа. – М.: Грааль, 2002.
3. Дурмишьян, А. Г. Газоконденсатные месторождения. – М.: Недра, 1979.
4. Инструкция по комплексным исследованиям газовых и газоконденсатных скважин. Р Газпром 086-2010. – М.: ООО «Газпром экспо», 2011.
5. Рид, Р., Праусниц, Дж., Шервуд, Т. Свойства газов и жидкостей/ пер. с англ.; под ред. проф. В. Б. Когана. – Л.: Химия, 1971.
6. Ширковский, А. И. Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. – М.: Недра, 1987.

УДК 622.765

М. К. Щербакова, ассистент

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА АЭРАЦИИ ЖИДКОСТИ НЕЗАТОПЛЕННОЙ СТРУЕЙ

Белорусский национальный технический университет, Республика Беларусь, 220013, г. Минск, проспект Независимости, д. 65. Тел. (017) 292 76 77; эл. почта hidrokaf@bntu.by

Ключевые слова: процесс аэрации, эжекция, незатопленная струя.

В статье приведён анализ существующих зависимостей для нахождения коэффициента эжекции, и сделан вывод о связи процесса захвата воздуха с параметрами струи и степенью её возмущённости.

Под аэрацией жидкости понимается насыщение ее пузырьками газа. Аэрация осуществляется распылением воды (жидкости) в воздухе или пропус-

канием пузырьков воздуха через воду, то есть путем непосредственного контакта воды и воздуха (кислорода).

С явлением насыщения жидкости пузырьками газа приходится сталкиваться при осуществлении целого ряда технологических процессов в промышленности [1]:

а) биохимическая очистка сточных вод в аэротенках, необходимая для поддержания жизнедеятельности содержащихся в жидкости организмов (активного ила);

б) флотация в случае обогащения руд полезных ископаемых и при очистке сточных вод;

в) барботирование газа (пропускание газа через слой жидкости); здесь можно отметить «мокрую очистку газов» от частиц пыли.

Следует отличать струйную аэрацию жидкости незатопленной свободной струей от аэрации с помощью струйных аппаратов типа эжекторов [2–4], обладающей своими особенностями.

Под явлением аэрации объема жидкости при помощи свободной незатопленной струи понимается вовлечение струей жидкости пузырьков окружающего ее газа (воздуха) в некоторый объем той же жидкости (находящейся, в основном, в покоящемся состоянии).

Одним из важнейших параметров, определяющих эффективность процесса аэрирования, является коэффициент эжекции, определяемый количеством газа, вносимого потоком жидкости в аэрируемый объем, а также, газосодержание и площадь поверхности контакта фаз.

Впервые понятие коэффициента эжекции $K_э$, было введено Баулиным К. К. в 1938 году в предложенным им уравнении эжекции [5]:

$$K_э - \frac{K_э^2}{2} \cdot \frac{P_x}{P_0} = (1 + V)^2 \quad (1)$$

где P_x – давление в приемной камере, ат;

P_0 – давление на выходе из сопла, ат;

V – скорость истечения среды из сопла, м/с.

Современные методы исследования связаны с количественным определением эжектирующей способности струи жидкости.

Наиболее простую зависимость для определения коэффициента эжекции получили Хендерсон и Мак-Карти [6], осуществлявшие эксперимент при скорости струи более 10 м/с. Допуская, что вовлечение воздуха происходит в шероховатостях пограничного слоя, авторы предложили следующую зависимость:

$$\frac{Q_в \cdot L}{Q_ж} = \left(\frac{d_c \cdot L}{d_n} \right)^2 - 1 \quad (2)$$

где $Q_{\text{в}}$, $Q_{\text{ж}}$ – соответственно, расходы эжектируемого воздуха и эжектирующей жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$;

$d_{\text{с}}$ – наибольший диаметр струи в точке определения, м;

$d_{\text{н}}$ – диаметр отверстия насадка, м;

L – длина струи, м.

Величина $d_{\text{с}}$ была определена авторами по фотографическим данным, что не всегда возможно в реальной обстановке и сопряжено с дополнительными трудностями.

Мещеряков Н.Ф. [7] предложил уравнение, в котором учитываются такие параметры, как высота вершин выступов шероховатостей и средний диаметр струи $d_{\text{с}}$ на расстояние l от насадка:

$$\frac{Q_{\text{в}}}{Q_{\text{ж}}} = f\left(\frac{\varepsilon}{r}\right)^2 + 2\left(\frac{\varepsilon}{r}\right) \quad (3)$$

где ε – относительное возмущение поверхности струи, м;

r – текущий радиус струи, м;

ε/r – безразмерная неоднородность струи.

Объем эжектируемого воздуха:

$$Q_{\text{в}} = f((\varepsilon^2 - 2 \cdot \varepsilon \cdot r)\pi \cdot V_{\text{н}}) \quad (4)$$

Расход воды:

$$Q_{\text{ж}} = \pi \cdot V_{\text{н}} \cdot r^2 \quad (5)$$

Влияние турбулентности, определяющей размер начальных возмущений струи на расход эжектируемого воздуха, рассмотрено в работе [8], в результате чего авторами получена зависимость:

$$\frac{Q_{\text{в}}}{Q_{\text{ж}}} = 1,4 \left[\left(\frac{\varepsilon}{r}\right)^2 + 2 \cdot \frac{\varepsilon}{r} - 0,1 \right]^{0,6} \quad (6)$$

где ε – относительное возмущение поверхности струи;

r – текущий радиус струи;

ε/r – безразмерная неоднородность струи.

Авторы работ [9, 10] на основании экспериментальных данных по определению аэрирующей способности плоских струй, получили эмпирическую зависимость:

$$\frac{Q_{\text{в}}}{Q_{\text{ж}}} = 0,26 \left(\frac{b}{p}\right) \left(\frac{H}{d}\right) 0,446 \left(1 - \frac{V_0}{V}\right) \quad (7)$$

где $Q_{\text{в}}$ и $Q_{\text{ж}}$ – расходы, соответственно, захватываемого воздуха и воды, $\text{м}^3/\text{с}$;

b – ширина струи, м;

p – периметр струи, м;

d – толщина струи, м;

V_0 – минимальная скорость, при которой начинается захватываться воздух, $\text{м}/\text{с}$;

V – скорость плоской струи, м;

Среди исследователей нет единого мнения относительно физической модели струйной аэрации. Герденсон, Ван де Санде и Смит определяют эжекционную способность турбулентной струи по формуле [11]:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{d_c}{d_n}\right)^2 - 1 \quad (8)$$

$$Q_1 = \frac{0,21 \cdot d_n^{3/2} \cdot V^2 \cdot h^{1/3}}{\sin \alpha} \quad (9)$$

где Q_1 и Q_2 – расходы, соответственно, воздуха и жидкости, м³/с;

d_c и d_n – диаметры, соответственно, струи и отверстий насадка, м;

V – скорость истечения струи, м/с;

h – высота падения струи, м;

α – угол падения струи.

В. Е. Русаков [12] предлагает определять коэффициент аэрации Q_a/Q , равный отношению объемного количества захваченного струей воздуха к расходу воды через насадок, из выражения:

$$\frac{Q_a}{Q} = 1,56 \cdot 10^{-6} X^{3/4} \left(\frac{l_c}{R_0}\right)^{3/4} \quad (10)$$

где l_c – высота свободного падения струи;

R_0 – гидравлический радиус насадка;

X – безразмерный комплекс равный $Re\sqrt{Fr}$ (приведенный к скорости истечения струи из насадка).

Отмечается, что при $X > 43200$, струя захватывает воздух при любой скорости свободного падения. Относительное количество воздуха, вовлекаемое струей в воду, возрастает с увеличением скорости истечения струи и относительной высоты свободного падения l_c / R_0 .

Исследуя захват воздуха падающими водяными струями Quama Y. и др. [13] получили зависимость для определения относительного расхода вовлеченного воздуха как сложную функцию безразмерных параметров:

$$\frac{Q_a}{Q} = 0,75 We^{1,09} Re^{-0,85} Fr^{-0,447} \left(\frac{L}{d}\right)^{0,728} \quad (11)$$

где We – число Вебера;

Re – число Рейнольдса;

Fr – число Фруда;

L – длина струи;

d – диаметр насадка.

Вид функции объясняется желанием авторов проникнуть в суть физического явления. Соотношение (11) получено для диаметров насадков $d = 8 \div 16$ мм, изменении длины струи $L = 0 \div 250$ мм. Струи создавались из коротких насадков при давлении от 0,15 до 3 ат.

Авторы работы [14] предложили более простое соотношение для определения объема вовлеченного воздуха при наклонном падении турбулентной струи, которое не в полной мере отражает физическую природу процесса:

$$\frac{Q_a}{Q} = 10^{-6} We \frac{L}{d} \quad (12)$$

Все представленные выше теоретические и экспериментальные соотношения отличаются друг от друга степенью влияния определяющих параметров и их содержанием. Анализ рассмотренных выражений показывает, что соотношения разных авторов плохо согласуются друг с другом, хотя большинство из них показывает увеличение объема вовлеченного воздуха с ростом скорости струи на выходе из насадка.

Проведенный анализ показывает, что процесс захвата воздуха определяется, в основном, параметрами струи и степенью ее возмущенности, что связано с устойчивостью струи к распаду.

Список литературы

1. Васильев, Б. К. Аэрация объема жидкости при помощи незатопленной свободно струи: дисс. канд. техн. наук. – Л., 1980. – 230 с.
2. Соколов, В. Я., Зингер, Н. М. Струйные аппараты. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1970. – 287 с.
3. Яворский, В. П. Исследование эжекторной аэрации для биохимической очистки сточных вод: автореф. дисс. канд. техн. наук. – Каунас, 1971. – 29 с.
4. Очистка производственных сточных вод в аэротенках / Я. А. Карелин, Д. Д. Жуков, В. Н. Репин. – М.: Стройиздат, 1973. – 223 с.
5. Баулин, К. К. О расчете эжектора / К. К. Баулин // Отопление и вентиляция, 1938, № 6. – С. 14–17 с.
6. Henderson, J. B. Entrainment by plunging jets / J.B. Henderson, M.S. McCarthy, N.A. Molloy // Chemeca'70: a conference convened by the Austral. Nat. Comm. of Institution of Chemical Eng. and the Australia, Melbourne and Sydney, 19 – 26 august 1970. / Academ. of Sci. – Melbourne and Sydney, 1970. – Sec. 2. – PP. 86–100 p.
7. Мещеряков, Н. Ф. Кондиционирующие и флотационные аппараты и машины / Н. Ф. Мещеряков. – М.: Недра, 1990. – 237 с.
8. Ervine, D. A. Effect of turbulence intensity of the rate of aurrentainment by plunging mater jets / D. A. Ervine, E. J. McKeogh, E. M. Elsayy // Proc. Insth. Civ. Engrs, 1980, № 2. – P. 425–455.
9. Ervine, D. A. The effect of a falling nappe on river aeration / D. A. Ervine, E. M. Elsayy // Internat. Assoc. for hydraulic research, San Paulo (Brazil), 27.07. – 1.08. 1975. / IAHR Congress. – San Paulo, 1975. – Proceedings V. 3, report c. 45, PP. 390–397 p.
10. Singewald, A. Kombination von Flotation von Schwerentrennung, ins-besondere zur Trennung von grobkörnigen Salzmineralien / A. Singewald // Aktuelle Prob. Theor. und Prax. Flotat. Clausthal, 27–31 diskuss 1972. – Zellerfeld, 1972. – PP. 52–60 p.
11. Van de Sande, E. Surface ontrainment of air by high velocity water jets / E. Van de Sande, J. M. Smith // Chemical Engineering Science. – 1973. – Vol. 28. – PP. 1161–1168 p.
12. Русаков, В. Н. Исследование процесса аэрации струй, поступающих в нижний бьеф гидросооружений: дисс. канд. техн. наук: 05.23.04 / В. Н. Русаков. – М., 1958. – 120 с.
13. Oyama, Y. Induction of air by jet streams / Y. Oyama, Y. Takashima, H. Idemura. – Kagaku Kenkyusko Hokoku, 1953. – 344 p.
14. Grant, R. P. Newtonial jet stability / R.P. Grant, S. Middleman // AICh.E.J. – 1966. – Vol. 12, № 4. – P. 669–677 p.