

© В.В. Мельник, А.В. Федаш, 2002

УДК 622.234.5.001.572

В.В. Мельник, А.В. Федаш

**АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ГИДРОЭЛЕВАТОРНОГО ПОДЪЕМА ПУЛЬПЫ
ПРИ СКВАЖНОЙ ГИДРОТЕХНОЛОГИИ ДОБЫЧИ**

С появлением первой работы Джеймса Томпсона (1852 г.) по теории водоструйного насоса прошло около ста пятидесяти лет. За этот период появилось множество работ посвященных гидроэлеваторному подъему отечественных и зарубежных ученых – Л.Д. Берман, А. Гибсон, К.К. Баулин, Ю.Д. Кирилловский, Б.Э. Фридман, Н.Н. Безуглов, Н.Г. Малухин и др.

Работа гидроэлеватора основана на принципе смещения двух потоков жидкости с разными скоростями. В гидроэлеваторе происходит непосредственная передача энергии от потока с большим запасом энергии к потоку с меньшим или нулевым запасом энергии. При скважинной гидротехнологии качестве засасываемого потока может быть вода или вода, смешанная с углем (пульпа).

В гидроэлеваторе двигатель и рабочий орган представляют одно целое, которую выполняет играет рабочая жидкость, имеющая необходимый запас энергии, что представляет предельную простоту аппарата.

Существующие методы расчета гидроэлеваторного подъема возможно разделить на три группы, а именно, аналитические, экспериментальные (эмпирические) и комбинированные.

Аналитические методы расчета производительности гидроэлеваторного подъема базируются на:

- теории смещения двух потоков, в основу которых положен закон количества движения;
- теории растекания свободной струи в массиве покоящейся жидкости;
- теории растекания турбулентной затопленной струи.

Несовпадение опытных и теоретических характеристик гидроэлеваторов привело некоторых исследователей к разработке эмпирических методов, основанных на экспериментальных данных, основным представителем которых является Б.Э. Фридман [1]. На основании продолжительного изучения применения гидроэлеваторов при разработке россыпей Б.Э. Фридман предложил методику расчета гидроэлеваторов, в основу которой положено соотношение между относительным напором гидроэлеватора β и его основным геометрическим параметром m .

Комбинированные методы расчета гидроэлеваторов основаны на экспериментальных и теоретических исследованиях и имеют большое значение.

В основу аналитического метода расчета гидроэлеваторов М.А. Маньжова [2, 3] положена теория смещения двух потоков, где заданными величинами являются: рабочий на-

пор, расход и удельный вес эжектируемого потока. Определяемыми величинами являются: относительный напор, коэффициент эжекции и геометрические параметры гидроэлеватора.

Несмотря на то, что метод расчета М.А. Маньжова оперирует достаточно большим количеством данных и поэтому сложен и трудоемок, автор не смог рассмотреть основные процессы, происходящие при подъеме

воды или пульпы. Например, при расчете не определяются продольные размеры гидроэлеваторов и нет рекомендаций по консистенции эжектируемой пульпы для экономичных режимов работы гидроэлеватора.

Г.А. Нурок [4, 5] продолжил исследования М.А. Маньжова, несколько расширив диапазон коэффициента эжекции ($a = 1-5$) и основного геометрического параметра ($m=2-20$). К сожалению, это еще более усложнило методику. Кроме этого при анализе влияния напора на рабочей насадке на величину основного геометрического параметра m , утверждение автора о его возрастании с увеличением рабочего давления не совсем правомочно. Это справедливо лишь при уменьшении соотношения скоростей активного и пассивного потоков и увеличении диапазона коэффициента эжекции.

Методы расчета, основанные на теории смещения потоков, в целом достаточно сложны и трудоемки, что не позволяет производить расчеты конструкции этого в целом простого аппарата для каждого случая его применения [3, 4, 6]. Во всех расчетных методиках довольно сложно (а подчас и невозможно) правильно учесть потери энергии отдельно для каждого потока (эжектируемого, рабочего и смешанного).

Среди аналитических методов расчета гидроэлеваторов методы расчета основаны на теории растекания турбулентной затопленной струи занимали главенствующее положение. В основу данного метода расчета положена теория растекания свободной струи жидкости в окружающей ее такой же среде. Предполагается, что на поверхности струи, как на поверхности раздела между двумя жидкостями, передвигающимися одна относительно другой, возникают вихревые явления и имеется пониженное давление, благодаря чему во внутрь струи всасываются частицы окружающей жидкости.

Остановимся подробнее лишь на некоторых аналитических исследованиях, дающих совершенно новую физическую трактовку явлениям, происходящим в гидроэлеваторе.

Г.И. Абрамович [7, 8] приходит к выводу, что в явлении турбулентного смешения двух потоков при работе гидроэлеватора имеет место соударение двух неупругих тел. При этом кинетическая энергия струй частично трансформируется в тепловую энергию движения молекул жидкости.

И.М. Коновалов [9], используя полученные проф. Миловичем уравнения движения струи, полагает, что основной практической схемой расчета гидроэлеватора является нахождение возможной высоты подачи, величины подсосываемого потока и геометрических размеров при заданном напоре (расходе напорной жидкости) и диаметре рабочей насадки. Автор рассматривает движение взаимодействующих струй, как установившееся движение потоков с переменным вдоль пути расходом.

И.А. Ржаницын [10] также признает правильность и целесообразность построения теории и методики расчета водоструйных насосов на основе теории растекания струи жидкости в массе жидкости, двигающейся с некоторой скоростью. Однако при этом он замечает, что общепринятую методику расчета для конкретных условий разработать невозможно, поэтому что расчет гидроэлеваторов должен проводиться на основании теории растекания струи в неподвижной жидкости, и потому результат будет являться лишь приближенным.

В следствие этого стали очевидными сложность и трудоемкость вычислений с использованием предложенных указанными авторами методик. Как показала практика применения гидроэлеваторов, спроектированные по этим методикам, развивали КПД (η) в несколько раз меньший, чем определенный расчетом.

Особый интерес представляют современные работы Н.Г. Назарова, П.П. Соловьева и Е.В. Сластенина [11].

Авторы дают расчет входного участка гидроэлеватора, указывая при этом, что при больших коэффициентах эжекции в конфузоре могут возникать зоны пониженного давления. В данной методике имеется также способ расчета сечения входного участка произвольной геометрии.

В результате проведенных исследований П.П. Соловьев и Е.В. Сластенин, основываясь на теории растекания струи жидкости, двигающейся с некоторой скоростью в неподвижной массе жидкости, производят определение угла растекания струи, который затем используют при расчете гидроэлеватора. Однако это только снижает точность расчета, поскольку в действительности растекание рабочей струи происходит в конфузоре в начальном участке камеры смещения, где скорости эжектируемой жидкости уже соизмеримы со скоростью рабочей струи.

Аналитические методы расчета гидроэлеваторов, основанные на теории турбулентных струй, имеют ряд общих недостатков:

- не подтверждение многих величин, участвующих в методе расчетов (экспериментально полученные величины имели с расчетными довольно значительные расхождения).
- недоучет явления внезапного расширения в камере смещения; многие методы сложны и трудоемки, поскольку для каждого сечения необходимо решение трех громоздких уравнений.

К недостаткам эмпирических методов расчета производительности гидроэлеваторов следует отнести также значительные расхождения (в два и более раз) опытных и расчетных коэффициентов эжекции α (по мнению Б.Э. Фридмана) при уменьшении значения основного геометрического параметра. Это не позволило Б.Э. Фридману разработать обоснованную методику расчета гидроэлеватора, работающего в режиме максимального η [1].

Комбинированные методы расчета, основанные например, на сочетании теорий смещения двух потоков и растекания свободной струи в массе покоящейся жидкости [12] привели к еще большей сложности и трудоемкости определения производительности гидроэлеваторов, а несовпадение опытных и расчетных данных так и не было уменьшено [13].

Особенно следует отметить широкомасштабные исследования по гидроэлеваторному подъему просыпи угля в скиповых стволах и шлама из водосборников выполненные под руководством Н.Н. Безуглова [14, 15].

В основу аналитического метода расчета гидроэлеваторов Безугловым Н.Н. положен закон сохранения количества движения. При выводе основного расчетного уравнения неразрывности потока и уравнения Бернулли учитывались потери на смешение в камере смешения, а также дополнительные потери на трение в проточной части гидроэлеватора и на расширение в диффузоре.

Для расчета гидроэлеватора Н.Н. Безугловым рекомендуются [14] следующие уравнения для определения:

- коэффициента эжекции

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{\beta(1 + \sum \xi)}} - 1 \cdot \frac{\rho_1}{\rho_0}; \quad (1)$$

- основного геометрического параметра

$$m = \frac{1 + \alpha}{\sqrt{\beta}}; \quad (2)$$

- коэффициента полезного действия гидроэлеватора

$$\eta = \alpha \beta \frac{\rho_1}{\rho_0}, \quad (3)$$

где β – коэффициент эжекции гидроэлеватора (отношение расхода подсосываемой жидкости к рабочей); β – относительный коэффициент напора (отношение напора нагнетания к напору на насадке); m – основной геометрический параметр (отношение площади сечения камеры смешения и рабочей насадки); ρ_1, ρ_0 – соответственно плотности подсосываемой пульпы и воды, кг/м³; η – коэффициент полезного действия гидроэлеватора; $\sum \xi$ – суммарный коэффициент сопротивления проточной части гидроэлеватора.

Авторы рекомендуют полученные уравнения (1) и (2) к широкому применению, поскольку, по их мнению, до настоящего времени фактически отсутствует единая общепринятая методика расчета гидроэлеватора с четкими рекомендациями конструктивных параметров, приемлемых в любых случаях и полностью учитывающая все явления в струйном насосе.

Анализ предлагаемых для расчета гидроэлеваторного подъема выражений (1) и (2) показывает, что при работе гидроэлеватора по воде и без потерь в его проточной части выражение (1) примет вид

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{\beta}} - 1 \quad (4)$$

или

$$\beta = \frac{1}{(i + \alpha)^2} \quad (5)$$

Такая структура зависимости относительного коэффициента напора и коэффициента эжекции была ранее предложена К.К. Баулиным, а позже и Ф.Д. Цейтлиным. Во-первых, зависимость $\beta = f(\alpha)$ является практически линейной, а не гиперболической. Во-вторых, зависимость предложенного вида определяет интегральную огибающую всего типоразмерного ряда гидроэлеваторов, для каждого значения основного геометрического параметра m . Причем какое значение m необходимо принимать – авторами не указывается. Что касается выражения (2), то не сложные алгебраические преобразования позволяют представить его следующим образом

$$\beta = \left(\frac{1 + \alpha}{m} \right)^2 \quad (6)$$

Известно, что работа гидроэлеватора в режиме максимального КПД определяется обратно пропорциональной зависимостью между относительным коэффициентом напора и основным геометрическим параметром, практически подтвержденной многими исследователями

$$\beta = \frac{1}{m}, \quad (7)$$

что находится в противоречии с предлагаемым Н.Н. Безугловым расчетным уравнением (2).

Далее авторы разработанного метода расчета гидроэлеватора для подъема угольной пульпы из зумпфов скиповых стволов дают рекомендации по выбору оптимальных геометрических параметров гидроэлеватора: угол подвода всасываемого потока, объем приемной камеры; форма входного участка в камеру смешения; форма рабочей насадки. Как показывает практика эксплуатации гидроэлеваторов, подобные параметры не оказывают определяющего влияния на их работу.

Наиболее приемлемый метод расчета гидроэлеватора, применительно к условиям скважинной гидродобычи угля, предлагается докт. техн. наук Н.Г. Малухиным. Он основывается на теории смешения всасываемого и рабочего потоков:

$$\beta = \frac{\frac{2}{m} + \frac{2\alpha^2}{m(m-1)} - \left(\frac{1+\alpha}{m}\right)^2 (1 + \xi_D + \xi_{cm}) - (1 + \xi_{ax}) \left(\frac{\alpha}{m-1}\right)^2}{(1 + \xi_n) - (1 + \xi_{ax}) \left(\frac{\alpha}{m-1}\right)^2} \quad (8)$$

где β – относительный коэффициент напора; α – коэффициент эжекции; m – основной геометрический параметр; ξ_{cm} – коэффициент сопротивления в камере смешения; ξ_{ax} – входящий коэффициент сопротивления; ξ_n – коэффициент сопротивления в насадке; ξ_D – коэффициент сопротивления в диффузоре.

В результате полученное уравнение расходно-напорной характеристики исследуется на экстремум и, как результат, выявляется режим работы с максимальным η с соотношением относительного коэффициента напора β и основного геометрического параметра по уравнению (7).

По современным представлениям о процессе эжектирования, всасывание пассивного потока угольной пульпы струей рабочей жидкости происходит в результате взаимодействия сил турбулентного трения. При этом происходит

вихревой рабочей (активной) и подсосываемой (пассивной) сред во входном сечении камеры смешения по которой поднимается угольная пульпа. Сложение вихревого и поступательного движения жидкости создает подъемную силу, поперечную по отношению к направлению поступательного движения.

Н.Г. Малухиным было обосновано и доказано, что такая распространенная гипотеза сущности процесса эжектирования (подсосывания угольной пульпы) в гидроэлеваторе не верна, т.е. опытами доказано, что всасывающая способность несвободных струй значительно выше, чем свободных.

Причем доказана неизменность производительности гидроэлеватора при снижении высоты подъема до минимальных значений. Но увеличение высоты подъема, превышающей оптимальные напорные возможности гидроэлеватора, приводит к снижению производительности гидроэлеватора не за счет уменьшения эжектирующей способности (она осталась неизменной), а за счет возникновения обратных циркуляционных токов смеси. Циркуляционные потоки, которые, участвуя в процессе эжектирования, уменьшают полезный объем подсосываемой жидкости воды (при постоянстве общего расхода), за счет собственного расхода возникшей циркуляции в камере смешения.

Таким образом сущность процесса эжектирования в гидроэлеваторе основана на образовании герметичного водяного поршня в камере смешения, что является главным, так как повышает производительность гидроэлеватора, а значит и увеличивает пропускную способность угольной пульпы за счет создания водяного поршня.

В результате проведенных аналитических исследований выявлено, что в настоящее время отсутствует единая общепринятая теория расчета гидроэлеваторов. Кроме этого, не вскрыты с достаточной точностью физические явления, происходящие в проточной части (в основной части в зоне смешения струй), а теоретические предпосылки многих исследователей в этой области не находят практического применения для определения производительности гидроподъема пульпы при скважинной гидротехнологии.

По нашему мнению наиболее точно отображает все указанные особенности гидроэлеваторного подъема угольной пульпы методика докт. техн. наук Н.Г. Малухина, в которой наиболее четко отражены процессы всасываемого и рабочего потоков угольной пульпы с учетом суммы коэффициентов сопротивления. И как следствие зависимости между относительным коэффициентом напора и основным геометрическим параметром, где главную роль играет водяной поршень.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фридман Б.Э. Гидроэлеваторы. - М.: Mashgiz. - 1960.
2. Маньжов Н.И. Методика расчетов струйных насосов гидроэлеваторов. Труды Томского инж.-строит. ин-та, №14, 1968.
3. Маньжов Н.И. Экспериментальные исследования гидроэлеваторов. Труды МИСИ. Вып. 45, 1963.
4. Нурок Г.А. Геотехнологические методы добычи полезных ископаемых - М.: Недра, 1964.
5. Нурок Г.А. Гидромеханизация открытых разработок - М.: Недра, 1970.
6. Богданов Е.И. Оборудование для транспорта и промывки песков россыпей. - М.: Недра, 1978.
7. Абрамович Г. Н. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов. - М., Энергоиздат, 1948.
8. Абрамович Г. Н. Турбулентное смешение потоков (удар). Сб. Статей по промышленной аэродинамике и вентилято-
9. Коновалов И.М. Движение жидкости с переменным расходом. Труды ЛИВТ, 1937, вып. 8.
10. Ржаницын Н.А. Водоструйные насосы (гидроэлеваторы). ГОНТИ, 1938.
11. Назаров Н.Г., Сластиенин Е.В., Соловьев П.Б. Гидравлические исследования эжектора. Научно-техн. Сообщение, ВНИИНеруд, 1967, №6.
12. Строение. Труды ЦАГИ, вып. 21, изд. ЦАГИ, 1935.

12. *Мустафин Х.Ш.* Исследование уравнения водяного эжектора., *Нерудные строительные материалы*, 1970, вып. 26.

13. *Мустафин Х.Ш.* Расчет эжектора на воде гидросмеси. Труды ВНИИНеруд, вып. 24, 1968.

14. *Безуглов Н.Н., Элов Г.А.* Опыт эксплуатации гидроэлеваторных установок по откачке воды из зумпфов. Проектирование и строительство угольных предприятий, 1976, №5, с.3-4.

15. *Безуглов Н.Н., Шериев А.А., и др.* Опыт и эффективность применения гидроэлеваторного способа очистки водосборников. – М.: Горный журнал, 1983, №5, с.21-23.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Мельник Владимир Васильевич – доцент, кандидат технических наук, кафедра «Подземная разработка пластовых месторождений», Московский государственный горный университет.

Федаш Анатолий Владимирович – доцент, кандидат технических наук, Московский государственный горный университет.