

СТАТЬИ

УДК 62-634.8:67.08
DOI 10.17513/use.38206

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ТЕЧЕНИИ ВОДОУГОЛЬНОЙ СРЕДЫ В ПРОЦЕССЕ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ

Капустин Д.А., Нечай Т.А.

ФГБОУ ВО «Луганский государственный педагогический университет», Луганск,
e-mail: kap-kapchik@mail.ru

Статья посвящена исследованию методов расчета потерь давления при течении топливной водоугольной суспензии (ТВУС), полученной при утилизации обводненных отходов углеобогащения. Рассмотрены основные преимущества технологии использования шламовых отходов для приготовления ТВУС, с ее последующим применением в качестве топлива для котельных установок или сырья для производства синтез-газа. Установлено, что основой для всех технологических процессов, связанных с водоугольными средами, являются трубопроводные системы. При этом расчет потерь давления при течении ТВУС связан с определенными трудностями, которые заключаются в получении аналитического вида обратной функции к выражению определения расхода. Для решения данной задачи широко используются как различные математические методы, в том числе численные, так и графические, которые позволяют получать значения искомых величин без значительного количества итераций. В работе произведено исследование точности и скорости расчета потерь давления, вычисленных с использованием напор-расходной характеристики построенной ЭВМ в виртуальном координатном пространстве, в ходе которого установлено, что данный подход позволяет сократить время, затрачиваемое на расчет потерь энергии при течении топливных водоугольных суспензий в два и более раза без потери точности.

Ключевые слова: течение, водоугольная суспензия, шламовые отходы, утилизация, расход, потери давления, метод, координатное пространство

RESEARCH OF METHODS FOR CALCULATING PRESSURE LOSS DURING COAL-WATER FLOW IN THE PROCESS OF COAL WASTE RECYCLING

Kapustin D.A., Nechay T.A.

Lugansk State Pedagogical University, Lugansk, e-mail: kap-kapchik@mail.ru

The article is devoted to the study of methods for calculating pressure losses during the flow of fuel-coal-water suspension (FCUS), obtained during the disposal of watered coal preparation waste. The main advantages of the technology of using sludge waste for the preparation of TVUS, with its subsequent use as fuel for boiler plants or raw materials for the production of synthesis gas, are considered. It has been established that pipeline systems are the basis for all technological processes associated with coal-water media. At the same time, the calculation of pressure losses during the flow of TVUS is associated with certain difficulties, which consist in obtaining an analytical form of the inverse function to the expression for determining the flow rate. To solve this problem, various mathematical methods are widely used, including numerical and graphical ones, which make it possible to obtain the values of the required quantities without a significant number of iterations. The work carried out a study of the accuracy and speed of calculating pressure losses calculated using the pressure-flow characteristic of a constructed computer in virtual coordinate space, during which it was established that this approach allows reducing the time spent on calculating energy losses during the flow of fuel-coal-water suspensions by two and more than once without loss of accuracy.

Keywords: flow, coal-water suspension, sludge waste, recycling, flow rate, pressure loss, method, coordinate space

Необходимость решения экологических проблем в сочетании с проблемой поиска дополнительных источников дешевых топливных ресурсов поставила в последнее время ряд сложных задач. Для угледобывающих регионов это в первую очередь утилизация отходов углеобогащения.

На территории Донбасса до недавнего времени функционировали 64 обогатительные фабрики, из них 20 коксохимических и 44 энергетические (включая 23 антрацитовые), в результате работы которых активно возрастают объемы как забалансовых, так и балансовых шламов, сосредоточенных

в отстойниках и илонакопителях. Шламо-накопители занимают территорию порядка 1975 га и представляют собой серьезную экологическую угрозу, требуя постоянного контроля и наблюдения, а также дополнительных затрат [1, 2].

Ежегодно обогатительные фабрики производят около 3,3 млн т отходов, при этом теряется от 10 до 20% добытого углерода. Угольная мелочь, особенно переувлажненная, является сложным для транспортировки продуктом, так как она прилипает к конвейерным лентам, забивается в желоба и загрязняет производственные помещения [2].

Наиболее простым способом использования угольных шламов в качестве источника тепловой энергии является добавка отходов к обогащенному углю. Однако эффективность такого подхода сложно оценить однозначно, так как при этом увеличивается зольность и влажность топлива, что снижает его теплотворную способность и увеличивает потери из-за недожога. Следует отметить, что факельное сжигание угольной пыли при зольности топлива более 25 % требует обязательной «подсветки» природным газом или мазутом. Кроме того, существенно возрастают затраты на эвакуацию отходов сжигания и возмещение экологического ущерба [3, 4]. Установлено, что потери от механического недожога при сжигании для влажности более 10 % резко возрастают и превышают номинальные в 3–4 раза [3].

Альтернативным способом утилизации шламов представляется использование топок с кипящим слоем, сжигание в которых является проверенной и эффективной технологией, используемой в мировой практике. Однако для успешной ее реализации необходимы модифицированные или специально разработанные котельные агрегаты, что ограничивает их повсеместное применение.

Еще один способ использования шламов – это приготовление на их основе топливной водоугольной суспензии (ТВУС). В этом случае отпадает необходимость обезвреживать исходный продукт, а его исходный гранулометрический состав и размер частиц существенно снижают энергоемкость процесса доизмельчения по сравнению с классическими технологиями [3–5].

На сегодняшний день предложены новые методы утилизации угольных шламов, такие как использование водоугольных суспензий в газификационных установках, включая плазменную газификацию. Главным преимуществом этой технологии перед методами прямого сжигания является меньшее воздействие на окружающую среду. Это обусловлено тем, что газообразные продукты находятся при высоких температурах в среде с низким содержанием кислорода (коэффициент избытка кислорода составляет 0,2–0,3). Это приводит к разложению и удалению наиболее опасных веществ, таких как диоксины, полихлорированные бифенилы, бензпирены и другие полициклические ароматические углеводороды. Еще одним преимуществом газификации является снижение количества газов, требующих очистки, а также уменьшение

объема зольного остатка в несколько раз. Зола практически не содержит углерод, что позволяет сэкономить средства на дорогостоящем оборудовании для очистки дымовых газов и обезвреживании твердых вторичных отходов.

Ни один технологический процесс, связанный с водоугольными суспензиями, не обходится без развитой трубопроводной сети, что, учитывая необходимость обеспечения высокой концентрации твердой фазы, обуславливает необходимость корректного определения гидравлических характеристик. Параметры течения зависят от свойств исходного сырья, используемых реагентов, температуры окружающей среды, уровня pH водной составляющей и других влияющих факторов [1, 4, 6]. Кроме того, для поддержания стабильности свойств водоугольной суспензии и обеспечения минимального сопротивления при транспортировке необходимо готовить ее с учетом регламентируемого гранулометрического состава и обеспечивать ее движение в энергетически выгодном режиме.

В связи с чем исследования способов расчета потерь давления при течении топливной водоугольной суспензии, полученной при утилизации обводненных угольных шламов, являются актуальными.

Цель исследования – изучение способов расчета потерь давления при течении топливной водоугольной суспензии, использующих графические методы их определения в виртуальном координатном пространстве, построенном ЭВМ.

Материалы и методы исследования

В общем случае движение топливной водоугольной суспензии, полученной из отходов углеобогащения, представляет собой движение жидкой среды с аномальными реологическими свойствами, которые описываются уравнениями течения вязкопластической жидкости. При этом основной задачей определения параметров движения суспензии является расчет потерь давления (потребный напор) в системе при заданной величине расхода ТВУС. В подавляющем большинстве случаев исходными математическими выражениями течения неньютоновских жидкостей выступают зависимости вида $Q = f(\Delta p)$, что обуславливает необходимость поиска обратной функции.

Для данной категории сред общепринятым выражением для расчета расхода суспензии по известной величине потерь давления является зависимость Букингема [7]:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8L\mu_{cm}} \left(1 + \frac{4}{3} \left(\frac{2\tau_0 L}{R\Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2\tau_0 L}{R\Delta p} \right)^4 \right), \quad (1)$$

где Δp – потери давления, Па; R – радиус трубопровода, м; L – длина трубопровода, м; μ_{cm} – структурная вязкость, Па·с; τ_0 – начальное (предельное) напряжение сдвига, Па.

Кроме того, в работе [8] предложено альтернативное выражение для расчета расхода топливной водоугольной с учетом особенностей ее структуры и свойств:

$$Q = \pi \left(\frac{2\tau_0 L}{\Delta p} \right)^2 \sqrt{(k_0 - k) \left(\frac{\Delta p}{\mu_{cm} L} - \frac{2\tau_0}{\mu_{cm} (R - R_j)} \right) (R^2 - R_j^2) + \frac{2\pi}{3} \sqrt{(k_0 - k) \left(\frac{\Delta p}{L\mu_{cm}} - \frac{2\tau_0}{\mu_{cm} (R - R_j)} \right) [R^2 - R_j^2]^3}}, \quad (2)$$

где R_j – радиус ядра потока $R_j = 2L\tau_0/\Delta p$, м; k – коэффициент, отражающий относительную долю потерь мощности сил давления на преодоление дискретных во времени молекулярных сил разрушения структуры, Вт/Н (м/с), $k_0 = 1$.

Получение аналитической зависимости вида $\Delta p = f(Q)$ для уравнений (1) и (2) затруднительно и сопряжено с использованием ряда допущений, что снижает точность расчета потерь энергии при течении топливной водоугольной суспензии. В связи с чем целесообразным является использование численных методов для вычисления потерь энергии при известной величине расхода жидкой среды.

К классическим методам решения нелинейных алгебраических уравнений относятся: методы итерации, касательной, Ньютона, Ньютона – Бroyдена, а также метод хорд и т.д. Кроме того, иногда используется графический метод решения, который заключается в определении точки пересечения построенных графиков функций, в случае расчета гидравлических систем – напор-расходной характеристики сети и заданного расхода суспензии. Следует отметить, что основным преимуществом такого метода является его простота, но для его реализации необходима реализация расчетных зависимостей в координатном пространстве. Также наблюдается некоторая сложность в реализации графического метода при использовании вычислительной техники для расчета гидравлических характеристик трубопроводной сети по транспортированию топливных водоугольных суспензий.

Результаты исследования и их обсуждение

Предлагается реализовать графический способ решения нелинейных алгебраиче-

ских уравнений в ЭВМ путем формирования виртуального координатного пространства, с последующим построением функций $Q = f(\Delta p)$ и $Q = Q_3 = const$ в одной системе координат (рис. 1).

Предложенный способ определения потерь давления при течении топливной водоугольной суспензии, полученной при утилизации отходов углеобогащения, может быть реализован следующим образом:

1. Осуществляется ввод исходных данных: структурной вязкости μ_{cm} , начального напряжения сдвига τ_0 , радиуса трубопровода R , м, расхода суспензии Q_3 м³/с, длины трубопровода L , м.

2. Производится построение виртуального пространства в координатах $\Delta p/Q$. Каждый его пиксель (шаг сетки) соответствует определенному значению Δp и Q . При этом величина шага по расходу на один-два порядка меньше значения физической величины, а для потерь давления округляется до 10 Па.

3. Вычисляется значение Q_0 , для базового перепада давления Δp_0 (в текущих расчетах $\Delta p_0 = 98100$ Па, что соответствует потерям напора $\Delta H = 10$ м), по формулам (1) или (2).

4. Вычисляется соотношение полученного расхода Q_0 с исходным Q_3 , что выражается соответствующим коэффициентом $K = Q_0/Q_3$. Для формирования участка вычисления полученный коэффициент K изменяется на определенную долю (для примера $\pm 20\%$). После производится расчет соответствующих величин потерь давления (мини-

мальное количество точек для построения кривой 3 шт.):

$$\Delta p_1 = 0,8K \cdot \Delta p_0,$$

$$\Delta p_2 = K \cdot \Delta p_0,$$

$$\Delta p_3 = 1,2K \cdot \Delta p_0.$$

5. На основании полученных значений потерь гидравлической энергии $\Delta p_{1,3}$, рассчитываются новые значения расхода $Q_1 - Q_3$.

6. Путем использования стандартных библиотек программного обеспечения осуществляется построение сплайна через полученные расчетные точки.

7. Производится построение прямой для Q_3 . Искомое значение потерь давления Δp

находится в точке пересечения построенной ранее кривой и перпендикуляра. Приведенный алгоритм проиллюстрирован на рис. 1.

Для реализации предложенного способа расчета потерь энергии при заданной величине расхода топливной водоугольной суспензии, разработано прикладное программное обеспечение на языке программирования Python с использованием библиотек Scipy [9]. И произведен ряд тестовых вычислений величины потерь давления с использованием выражения (1) для следующих исходных данных: $R = 0,05$ м, $L = 50$ м, $\mu_{cm} = 1,11$ Па·с, $\tau_0 = 20$ Па, $Q_3 = 0,007$ м³/с, количество точек для построения графика функции 3, 5, 7, 9, 11.

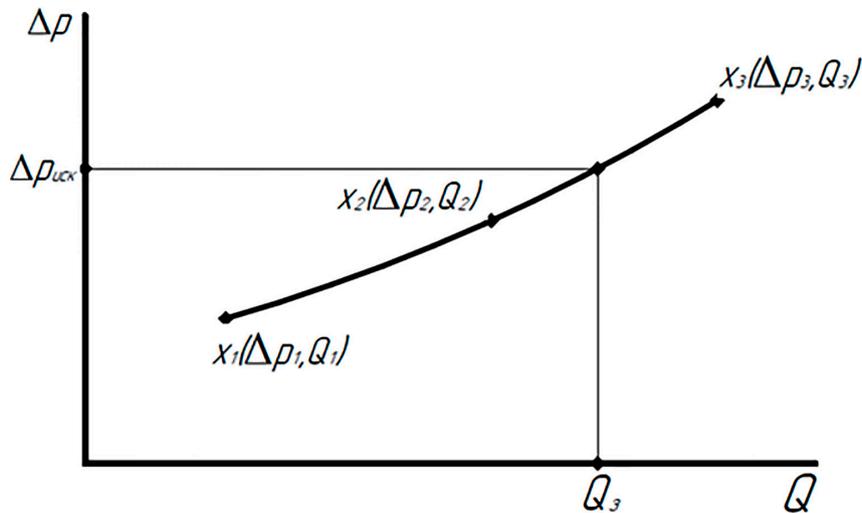


Рис. 1. Определение величины потерь давления (напора) при течении ТВУС в виртуальном координатном пространстве

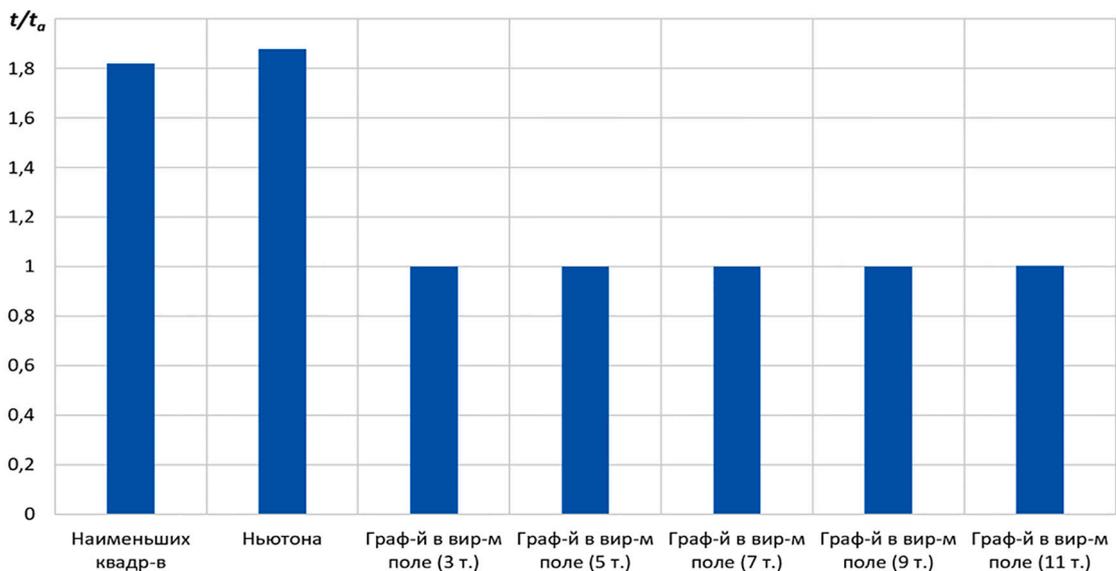


Рис. 2. Относительное время расчета потерь давления

При этом произведена оценка относительного времени t/t_a (где t_a – время расчетов с использованием виртуального координатного пространства) выполнения расчетов (рис. 2), а также точности определения гидравлических величин для предложенного способа, методов Ньютона и наименьших квадратов.

В ходе анализа результатов, приведенных на рис. 2, установлено, что время расчета потерь гидравлической энергии при течении ТВУС значительно (на 80–85%) сокращается при использовании предложенного способа, что обуславливает целесообразность его применения, в том числе в расчетах на ЭВМ. Из двух стандартных подходов более предпочтительным представляется применение метода наименьших квадратов, который также позволяет сократить время выполнения программы до 5%.

Установлено, что с ростом количества точек, используемых для построения графика функции, время вычислений практически не изменяется.

Следует отметить, что наименее точным является графический способ вычисления перепада давления с использованием виртуального координатного пространства, однако максимальная величина относительного отклонения не превышала 0,002%, а значит, погрешностью определения гидравлических характеристик предложенным способом можно пренебречь.

С ростом количества расчетных точек наблюдается монотонное возрастание точности вычисления потерь давления, однако минимального количества точек уже достаточно для корректного расчета параметров трубопроводной сети.

По результатам исследований можно сделать следующие рекомендации:

- шаг пикселей (сетки) по шкале расхода целесообразно выбирать кратным величине Q_3 , что нивелирует отклонение величины расхода, связанное с особенностями построения координатного пространства;
- величину деления по оси потерь давления следует принимать порядка 10 Па для обеспечения минимальной величины отклонения при его определении;
- количество точек, используемых для построения графика функции, может быть использовано вплоть до 11, без заметного увеличения времени вычислений, при этом достаточно использования и трех расчетных значений.

Выводы

1. Отрасль утилизации обводненных отходов углеобогащения характеризуется по-

всеместным использованием трубопроводных систем.

2. Основной проблемой при расчете параметров работы гидротранспортной системы является определение потерь давления, так как для ряда неньютоновских жидкостей (ТВУС также относится к их числу) не представляется возможным аналитическое получение функции перепада давления.

3. Предложен и исследован новый способ вычисления потерь гидравлической энергии, основанный на их графическом определении в виртуальном координатном пространстве.

4. Установлено, что время выполнения расчетов по предложенному методу на 80–85% меньше, чем численными методами (Ньютона, наименьших квадратов), реализованными в библиотеке Scipy. При этом погрешностью вычисления перепада давления можно пренебречь.

5. Следует отметить, что рост количества расчетных точек, используемых для построения графика функции потерь давления, обуславливает снижение погрешности определения гидравлических характеристик, однако для инженерных расчетов возможно использование только трех (минимальное количество для построения кривой).

6. Дальнейшие исследования предложенного метода определения потерь давления планируется проводить в рамках его оптимизации, с целью повышения точности расчетов, а также сокращения затрачиваемого времени.

Список литературы

1. Капустин Д.А., Гутько Ю.И., Орешкин М.В., Сентяй Р.Н. Оценка объема отходов обогащения угля, требующих утилизации // Вестник ЛГУ им. В. Даля. 2020. № 7 (37). С. 202–207.
2. Капустин Д.А., Гутько Ю.И., Орешкин М.В., Швыров В.В. Технологии утилизации отходов обогащения // Вестник ЛГУ им. В. Даля. 2020. № 6 (36). С. 43–49.
3. Бойко Е.Е. Разработка методических основ сжигания тонкодисперсных водоугольных суспензий при плазменном сопровождении в котлоагрегатах ТЭС: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2018. 162 с.
4. Баранова М.П. Технологии получения и использования топливных водоугольных суспензий из углей различной степени метаморфизма: дис. ... докт. техн. наук. Москва, 2014. 275 с.
5. Галькеева А.А., Мингалеева Г.Р., Горбунов С.Ю. Анализ применения углей различных марок для производства энергии и химических продуктов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. № 11/12. С. 69–79.
6. Кондратьев А.С., Овсянников В.М., Олофинский Е.П., Степин Б.С., Чиненков И.А. Транспортирование водоугольных суспензий: гидродинамика и температурный режим. М.: Недра, 1988. 213 с.
7. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: учебник для вузов. 7-е изд., испр. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
8. Капустин Д.А., Гутько Ю.И., Кущенко А.В. Развитие теоретических основ движения высококонцентрированной суспензии // Вестник ЛГУ им. В. Даля. 2022. № 8 (62). С. 145–151.
9. Хахаев И.А. Практикум по алгоритмизации и программированию на Python. 2-е изд., испр. М.: ИНТУИТ, 2016. 179 с.