ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СЕТИ В ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ И НЕФТЕПЕРЕРАБОТКЕ: ФОРМИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ

Шмелёв А. С., Смалий В. В.

ГІДРАВЛІЧНІ МЕРЕЖІ В ХІМІЧНІЙ ТЕХНОЛОГІЇ І НАФТОПЕРЕРОБЦІ: ФОРМУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК

Шмелев О. С., Смалій В. В.

HYDRAULIC NETWORKS IN CHEMICAL TECHNOLOGY AND OIL REFINING: FORMATION AND CALCULATION

Shmelev O., Smalii V.

Научный центр изучения рисков «РИЗИКОН»
г. Северодонецк, Луганская обл., Украина
asshmel@mail.ru

Актуальность исследуемого вопроса

Химико-технологические производства представляют собой десятки аппаратов, связанных между собой живописной сетью трубопроводов. Это обуславливает серьёзные трудности при их моделировании и последующем расчёте. Однако проблема решается, если всю сеть трубопроводов рассматривать как один объект – гидравлическую сеть. А учитывая аналогию между электрическими и гидравлическими сетями, весь мощный аппарат теории графов может быть использован для получения результата.

Основная часть

$$\mathrm{P}_{\mathrm{inp}}^{\mathrm{j}} - \mathrm{P}_{\mathrm{out}}^{\mathrm{k}} = \lambda_{\mathrm{i}} \cdot \rho_{\mathrm{i}} \cdot \frac{\mathrm{u}_{\mathrm{i}}^2}{2} \tag{1}$$

Уравнение (1) – это классическая запись в математической форме закона сохранения энергии при движении по горизонтальной трубе потока плотностью ρ_i с линейной скоростью u_i. Здесь $\mathrm{P}_{\mathrm{inp}}^{\mathrm{j}}$ и $\mathrm{P}_{\mathrm{out}}^{\mathrm{k}}$ – давления на входе и выходе из трубы, λ_{i} – коэффициент гидравлического сопротивления трубы, который зависит от геометрических размеров и конфигурации самой трубы, характера обработки её внутренней поверхности и режима течения потока. При проектировании нового производства этот параметр рассчитывается по эмпирическим формулам или утверждённым методикам; для создания компьютерных тренажеров он настраивается для каждой трубы по результатам работы реального производства.

В практике расчёта гидравлических сетей уравнение (1) записывается обычно в более удобной форме (1а):

$$\mathrm{P}_{\mathrm{inp}}^{\mathrm{j}} - \mathrm{P}_{\mathrm{out}}^{\mathrm{k}} - \mu_i \cdot u_i = 0 \tag{1a}$$

Здесь $\mu_i = \lambda_i \cdot \rho_i \cdot \frac{abs(u_i)}{2}$ выступает в качестве параметра уравнения (1а), линейного относительно u_i. Таких уравнений в полной *задаче* N_R *по числу потоков – «рёбер».* Уравнения материального баланса в «узлах», число которых N_U, позволяют определить ещё N_U неизвестных – давления в «узлах». Итого $N_X = N_R + N_U$ переменных.

Материальные балансы в «узлах» представлены уравнением (2):

$$\sum_{k=1}^{k=N_{inp}} F_K - \sum_{k=1}^{k=N_{out}} F_K = 0 \tag{2}$$

Здесь $\boldsymbol{F}$ – мольный или весовой поток, моль/сек или кг/сек, N_{inp} – число потоков, входящих в данный узел, N_{out} – число потоков, выходящих из узла. Мольный расход – это $F_i = \varepsilon_i \cdot S_i \cdot \frac{u_i}{v_i}$, где ε_i – степень открытия трубы, S_i – площадь её сечения, v_i – мольный объём потока. Если $\psi_i = \frac{\varepsilon_i \cdot S_i}{v_i}$, то $F_i = \psi_i \cdot u_i$ и тогда:

$$\sum_{k=1}^{k=N_{inp}} \psi_k \cdot u_k - \sum_{k=1}^{k=N_{out}} \psi_k \cdot u_k = 0 \tag{2a}$$

Итак, уравнения (1а) совместно с уравнениями (2а) образуют систему N_X уравнений, линейных относительно переменных u_i.

На основании вышеизложенного представляется логичным следующий алгоритм автоматического формирования задачи расчёта гидравлической сети в процессе создания экранной формы технологической схемы.

1) Число аппаратов задачи определяется в процессе выбора аппарата из Базы аппаратов. Часть аппаратов, время пребывания в которых технологической среды пренебрежимо мало (по мнению пользователя), считаются «узлами» или безобъёмными аппаратами; остальные аппараты – «вершины», давление в которых определяется их спецификой. К таковым, например, относится окружающая среда или ёмкости для хранения сырья и полупродуктов. «Узлы» и «вершины» нумеруются последовательно от 1 (единицы) в разные группы. Не лишним будет заметить, что бывают двух- и более полостные аппараты (напр. теплообменники), и каждая из полостей взаимодействует с различными средами, никогда не пересекающимися (напр. теплофикационная вода в рубашке). Так что всеобъемлющих рекомендаций дать невозможно. Результатом будет определение чисел N_U – число узлов и N_W – число вершин и присвоение номера от 1 и выше каждому узлу и каждой вершине.

2) Число «рёбер» – потоков N_R определяется в процессе связывания аппаратов потоками. При этом каждому «ребру» - потоку должен быть присвоен его номер в локальной Базе задачи, и определены номера начального и конечного узлов (или вершин), ограничивающих этот поток. Среда, протекающая в этой трубе, определена начальным узлом при «нормальной» работе. Если же давление в приёмнике будет выше чем в источнике, то среда определится конечным узлом, а решением задачи будет отрицательное значение расхода по этой трубе.

3) Всем N_R неизвестным линейным скоростям всех потоков u_i присваиваются начальные значения, например, 1 (единица).

4) Заполняется нулями расширенная матрица системы линейных уравнений $A(N_X, N_{X+1})$.

5) С использованием численных значений u_i рассчитываются все коэффициенты уравнений (1а) и (2а) ψ_i и μ_i.

6) Последовательно от 1 до N_R заполняются строки матрицы $\boldsymbol{A}$ коэффициентами уравнений (1а): $A_{i,i} = -\mu_i$. Если теперь $\boldsymbol{j}$ – номер начального узла, то $A_{i,j} = 1$, если же это вершина, то $A_{i,N_X+1} = -P_j$. Дальше, если $\boldsymbol{k}$ – номер конечного узла, то $A_{i,k} = -1$, а если вершина, то $A_{i,N_{X+1}} = P_K$.

7) Теперь по столбцам от N_{R+1} и дальше каждый столбец скалярно умножается на вектор $\psi = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{N_R})$, и результат записывается в N_{R+1}-ю строку матрицы $\boldsymbol{A}$.

8) Сформированная таким образом расширенная матрица $A(N_X, N_{X+1})$. позволяет стандартными методами линейной алгебры получить решение - вектор $X(N_X)$, первые N_R компонент которого ассоциируются с линейными скоростями потоков в каждом из рёбер, а остальные компоненты с давлениями в узлах.

9) Естественно, что полученные значения скоростей потоков $u_i^{\text{расч}}$ не совпадут с используемыми в пункте 5 значениями u_i, поэтому придётся вернуться к пункту 5 со скорректированными значениями, например: $u_i = \beta \cdot u_i^{\text{расч}} + (1-\beta) \cdot u_i$. Здесь β - параметр, регулирующий сходимость итераций, $0 \leq \beta \leq 1$. Если же различие рассчитанных и использованных значений линейных скоростей приемлемо, то задача решена.

Для иллюстрации выше изложенного рассматривается «задача о душе». По трубам горячей и холодной воды через вентиль в смеситель подаются жидкости. Регулировкой степени открытия соответствующих вентилей устанавливается желанная температура. К сожалению, сосед этажом ниже тоже начал пользоваться водой, чем нарушил соотношение потоков горячей и холодной воды у Вас. Вам приходится реагировать.

Данная задача представляется как гидросеть, содержащая пять вершин: две с давлением 3 и 4 атм и три с давлением 1, 1,5 и 2 атм, 3 узла – смесителя, 7 рёбер-потоков, схема которой представлена на рис. 1. Даны также значение коэффициента гидродинамического сопротивления труб **λ** = 10, диаметр трубопроводов – 50 мм, плотность жидкости, текущей по трубопроводам (воды) – 1000 кг/м^3, мольный объём (воды) – 0,018 м^3/кмоль. Согласно условию, необходимо рассчитать давления в узлах и линейные скорости потоков.

Моделирование производилось в среде MathCad. Результат моделирования гидросети исходя из заданных условий представлен на Рис. 2: на схеме изображены найденные давления в узлах 1, 2, 3 и мольные расходы потоков по трубопроводам 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7. Наблюдается сходимость балансов по потокам в узлах 1, 2 и 3 гидросети и соответствие направлений потоков перепадам давлений в трубопроводах гидросети. Также в алгоритме была решена задача возможного несоответствия заданных направлений потоков результатам моделирования. Алгоритм автоматически определяет несоответствия и меняет направления необходимых потоков на противоположные, заново выполняет расчёт в соответствии с исправленными исходными данными. В результате выполняется сходимость материальных балансов в узлах и соответствие направлений потоков перепадам давлений в моделируемой гидросети.

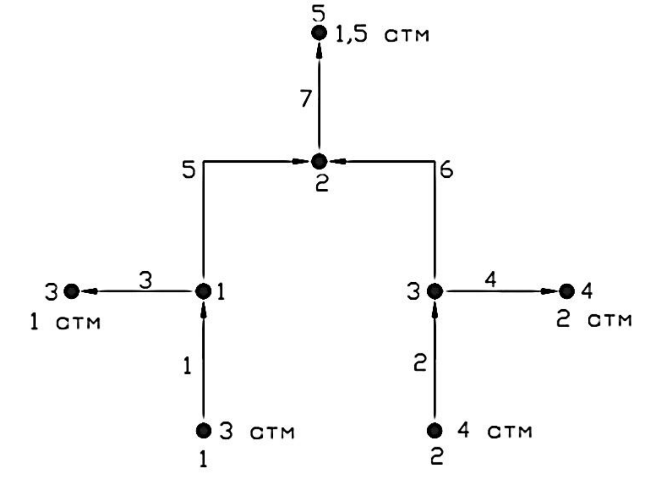

Рис. 1. Схема гидросети

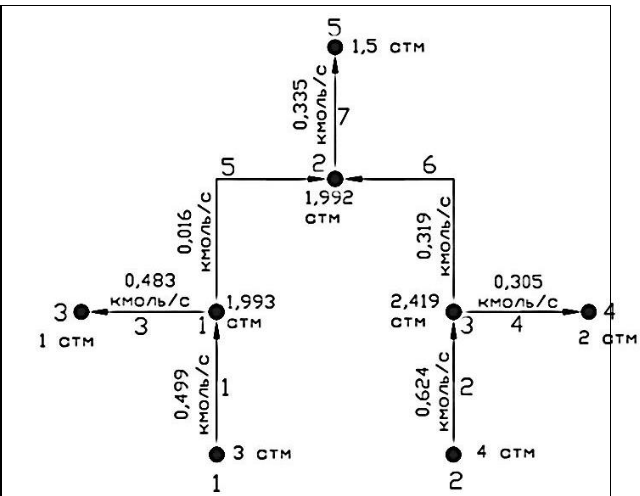

Рис. 2. Результат моделирования

Выводы

1. Предложен алгоритм расчёта гидравлической сети, заключающийся в решении системы квазилинейных уравнений относительно неизвестных расходов по «рёбрам» сети и давлений в «узлах».
2. Для иллюстрации алгоритма рассчитана простейшая гидравлическая сеть, возникающая при пользовании душем. Программа составлена в MathCad.
3. Отмечено, что в случае получения отрицательных значений потоков, что интерпретируется как изменение направления, в отличие от электрических сетей необходимо учитывать изменение свойств продукта, движущемуся по этому ребру.