

- Использование алгоритма увеличивает степень объективности при выборе стратегии закупочной логистики, так как эксперт определяет только соотношения и не знает конечные веса факторов, что в целом положительно сказывается на экономических показателях предприятия.

Литература

1. Мешалкин В.П. Экспертные системы в химической технологии. М.: Химия, 1995. 368с.
2. Мешалкин В.П., Дови В.Г., Марсанич А. Принципы промышленной логистики. Москва/Генуя, «РХТУ», 2002. 727с.
3. Мешалкин В.П., Дови В. Г., Марсанич А. Стратегия управления логистическими цепями химической продукции и устойчивое развитие. Москва/Генуя, «РХТУ», 2003. 531с.
4. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993.
5. Лещинский Б.С. Нечеткий многокритериальный выбор объектов недвижимости // Вестник ТГУ. 2003. Вып. 269. с. 116–119.
6. Саати Т. Математические модели конфликтных ситуаций. М.: Советское радио, 1977. 302 с.
7. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. Пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 798 с.
8. Zimmermann H. J. (1987) Fuzzy sets, decision making, and expert systems. London: Kluwer Academic Publishers.

Математическая модель тепловой сети и разработка рекомендаций по расчету КПД для произвольного температурного графика

чл.-корр. РАН д.т.н. проф. Систер В.Г., Ямчук А.И., д.т.н. доц. Поливода Ф.А.
Университет машиностроения, ОАО ЭНИН им. Г.М. Кржижановского
8 (499) 267-19-70, nastya831983@mail.ru, 8 (495)955 33 01, polivoda@eninet.ru

Аннотация. Предложена обобщенная математическая модель тепловой сети, на основании которой возможно её исследование для различных методов регулирования, в т.ч. и количественно-качественного регулирования тепловой нагрузки. Получено в аналитическом виде уравнение для расчета КПД тепловой сети, что дает возможность проектным организациям оптимизировать длину передачи теплоносителя, определять оптимальный расход горячей воды в трубопроводе и его диаметр.

Ключевые слова: тепловая сеть, расчет КПД, оптимизация, энергосбережение

Введение

Актуальной задачей энергосбережения является экономия энергии на тепловых сетях. Радиус действия современных тепловых сетей доходит до 50 км, а их протяженность в крупных городах составляет свыше 2000 км. Достаточно сказать, что ежегодно на тепловых сетях в России теряется более 250 млн. Гкал тепла. Тепловые сети по своей сущности являются пассивными звеньями систем теплоснабжения, и от их правильной эксплуатации зависит эффективность всей системы энергоснабжения города.

Наряду с созданием новых теплоизолирующих материалов для теплотрасс актуальной проблемой является управление режимами сети; выбор наиболее правильных графиков регулирования, что позволит не внося больших капитальных затрат добиться существенного повышения эффективности теплоснабжения. Цель настоящей работы - создать обобщенную теоретическую модель теплообмена сети с окружающей средой, необходимую для выработки критериальных зависимостей, по которым возможно построение инженерных методик, направленных на повышение эффективности теплосетей. При этом основной акцент должен

быть сделан на оптимизацию метода количественно-качественного регулирования теплоносителя, на уменьшение электропотребления сетевыми насосами, что в совокупности с минимизацией тепловых потерь представляет непростую научную задачу.

Теряемая в единицу времени тепловая энергия пропорциональна длине теплотрассы l , и носит название линейных потерь Q_l . Из отпущенной источником тепла мощности Q_i до потребителя доходит только мощность Q_0 , составляющая часть Q_i , поэтому за меру эффективности тепловой сети, естественно, принять хорошо известное отношение «потреблённая/отпущенная» тепловая энергия, или её КПД:

$$\eta = \frac{Q_0}{Q_i}. \quad (1)$$

Принимая во внимание закон сохранения энергии

$$Q_i = Q_0 + Q_l,$$

запишем формулу (1) в виде:

$$\eta = 1 - \frac{Q_l}{Q_i}. \quad (2)$$

Величина потерь Q_l зависит как от физических свойств теплотрассы, так и от температуры окружающей среды и температурного графика тепловой сети.

В простейшей модели тепловой сети (см. рисунок 1) источник тепла связан с потребителем двухтрубной сетью длиной l . Температуры теплоносителя в подающей трубе обозначим через t_1 у источника тепла и t'_1 - у потребителя. Соответственно через t_2 и t'_2 обозначим температуры в обратной трубе. При передаче тепла от источника к потребителю температура теплоносителя вдоль сети меняется. Изменение температуры от t_1 до t'_1 происходит в результате остывания теплоносителя при его распространении вдоль трубы.

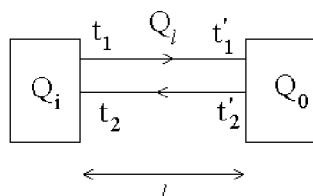


Рисунок 1 – Модель тепловой сети

Для расчета тепловых потерь вдоль трубопровода рассмотрим участок трубы длиной dx на расстоянии x от источника тепла (см. рисунок 2).

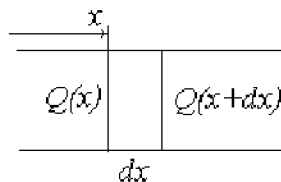


Рисунок 2 – Участок трубы длиной dx на расстоянии x от источника тепла

Тепловой поток $Q(x + dx)$ в сечении с координатой $x + dx$ меньше теплового потока $Q(x)$ в сечении с координатой x из-за линейных потерь. Обозначим через R удельное (на единицу длины) тепловое сопротивление теплопередачи от теплоносителя окружающей среде. Из условия баланса тепловых потоков:

$$Q(x) = Q(x + dx) + \frac{1}{R} (t - t_0) dx, \quad (3)$$

вытекает дифференциальное уравнение, описывающее изменение теплового потока вдоль трубы:

$$\frac{dQ}{dx} = -\frac{1}{R}(t - t_0). \quad (4)$$

Входящий в уравнение (4) тепловой поток $Q(x)$ выразим через теплоемкость c_p теплоносителя и его массовый расход G в единицу времени и температуру на данном участке трубы:

$$Q(x) = c_p G t \quad (5)$$

Подставляя формулу (5) в уравнение (4), получим дифференциальное уравнение, описывающее изменение температуры вдоль трубы:

$$\frac{d}{dx}(c_p G t) = -\frac{1}{R}(t - t_0) \quad (6)$$

Общее решение полученного уравнения находится аналитически, если пренебречь изменением с температурой теплоемкости теплоносителя c_p и сопротивления теплопередачи R . В результате приходим к дифференциальному уравнению, которое описывает зависимость температуры воды в трубе от расстояния до источника тепла:

$$\frac{dt}{dx} = -\frac{1}{c_p R G}(t - t_0),$$

решение этого уравнения имеет вид:

$$t = t_0 + (t_1 - t_0) \cdot \exp\left\{-\frac{x}{c_p R G}\right\}.$$

В частности, при $x = l$, в конце трубопровода, температура воды составит:

$$t_1' = t_0 + (t_1 - t_0) \cdot \exp\left\{-\frac{l}{c_p R G}\right\}. \quad (7)$$

Аналогичной формулой связаны температуры t_2' и t_2 в обратном трубопроводе:

$$t_2 = t_0 + (t_2' - t_0) \cdot \exp\left\{-\frac{l}{c_p R G}\right\} \quad (8)$$

Данные выражения для оценки температуры теплоносителя в конце остывающего трубопровода полностью совпадают с полученными формулами проф. Соколовым Е.Я., что говорит о правильном выборе модели исследований. Развивая дальше эту модель, выведем уравнение для КПД тепловой сети, что не было предложено ранее.

Поступающий потребителю тепловой поток тратится на поддержание заданной температуры t_N в отапливаемых помещениях с суммарным тепловым сопротивлением R_0 и на горячее водоснабжение (с тепловым потоком Q_c). Из условия баланса тепловых потоков следует, что:

$$Q_c + \frac{t_N - t_0}{R_0} = c_p G(t_1' - t_2') \quad (9)$$

Балансные уравнения (7)-(9) при заданных физических параметрах тепловой сети, суммарном тепловом сопротивлении потребителя и температурой t_N в помещении связывают между собой шесть переменных: $t_1, t_2, t_1', t_2', t_0, G$. Расход тепла на горячее водоснабжение

считается величиной мало меняющейся, т.е. принимается также постоянной. Для установленного температурного графика сети, например 130/70, количество переменных уменьшается до четырех: t_1, t_2, t_0, G . Температура окружающей t_0 среды зависит от метеорологических условий и в течении суток может меняться в значительных пределах особенно, когда климат является континентальным. Величина t_0 является управляющим параметром, после задания которого, температуры t_1, t_2 и массовый расход теплоносителя однозначно определяются решениями системы балансных уравнений (7)-(9).

Перейдем к анализу следствий, вытекающих из найденных соотношений. В качестве характеристики потребителя тепловой энергии введем его дифференциальные потери:

$$q_d = - \frac{dQ_0}{dt_0},$$

представляющие собой увеличение потребления тепловой энергии при уменьшении окружающей температуры на 1 °С.

Линейные потери вдоль подающей трубы определяются интегралом:

$$Q_{ll} = \int_0^l \frac{t - t_0}{R} dx, \quad (10)$$

подставляя в (10) решение уравнения (6), найдем:

$$Q_{ll} = \frac{t_1 - t_0}{R} \int_0^l \exp\left\{-\frac{x}{c_p RG}\right\} dx,$$

откуда после интегрирования по x :

$$Q_{ll} = (t_1 - t_0) c_p G \left(1 - \exp\left\{-\frac{l}{c_p RG}\right\}\right). \quad (11)$$

Средняя температура вдоль трубы, подающей теплоноситель, определяется по формуле:

$$\tau_1 = \frac{1}{l} \int_0^l t(x) dx. \quad (12)$$

Подставляя в (12) решение уравнения (6), найдем:

$$\tau_1 = t_0 + (t_1 - t_0) \frac{1}{l} \int_0^l \exp\left\{-\frac{x}{c_p RG}\right\} dx,$$

откуда после интегрирования по x найдем:

$$\tau_1 = t_0 + (t_1 - t_0) \frac{c_p RG}{l} \left(1 - \exp\left\{-\frac{l}{c_p RG}\right\}\right). \quad (13)$$

Из формул (11), (13) следует, что: $Q_{ll} = \frac{l}{R} (\tau_1 - t_0)$.

Обозначим через: $z = \frac{l}{c_p RG}$ безразмерную переменную, входящую в формулы (7),

(8), (11), (13). Из соотношений (7), (13) находим:

$$t_1 - t_0 = (t_1 - t_0) e^{-z}, \quad (14)$$

$$\tau_1 - t_0 = (t_1 - t_0) \frac{1}{z} (1 - e^{-z}), \quad (15)$$

исключим e^{-z} . В результате получим:

$$t_1 - t_1' = z(\tau_1 - t_0),$$

или после подстановки z :

$$c_p G(t_1 - t_1') = \frac{l}{R} (\tau_1 - t_0). \quad (16)$$

Уравнение (14) представляет собой закон сохранения энергии для подающей трубы, в котором потери выражены через среднюю температуру теплоносителя.

Для учета потерь тепла, связанных с неизолированными участками сети, арматурой и пр., предлагается модифицировать полученные формулы и записать линейные потери в виде:

$$Q_{1l} = \frac{l(1 + \beta)}{R} (\tau_1 - t_0), \quad (17)$$

где: $\beta = 0.2$ – нормативный коэффициент.

В этом случае формула (16) преобразуется в следующую:

$$c_p G(t_1 - t_1') = \frac{l(1 + \beta)}{R} (\tau_1 - t_0). \quad (18)$$

Аналогичные расчеты можно провести для обратной трубы. В этом случае:

$$t_2 - t_0 = (t_2' - t_0) e^{-z} \quad (19)$$

$$\tau_2 - t_0 = (t_2' - t_0) \frac{1}{z} (1 - e^{-z}) \quad (20)$$

$$Q_{2l} = \frac{l(1 + \beta)}{R} (\tau_2 - t_0) \quad (21)$$

где: τ_2 – средняя температура теплоносителя вдоль трубы, а закон сохранения энергии принимает вид:

$$c_p G(t_2' - t_2) = \frac{l(1 + \beta)}{R} (\tau_2 - t_0). \quad (22)$$

Тепловые потери вдоль всей теплотрассе равны сумме потерь (17) и (21):

$$Q_l = \frac{2l(1 + \beta)}{R} (\tau - t_0), \quad (23)$$

где: $\tau = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2}$ – средняя температура теплоносителя по теплотрассе.

Отпущенная источником в единицу времени тепловая энергия выражается через теплоемкость c_p теплоносителя и его массовый расход G в единицу времени:

$$Q_i = c_p G(t_1 - t_2). \quad (24)$$

Полученная потребителем тепловая энергия выражается формулой:

$$Q_0 = c_p G(t_1' - t_2').$$

Складывая почленно формулы (18) и (22), получим закон сохранения энергии для всей теплосети:

$$Q_i = Q_0 + \frac{2l(1 + \beta)}{R} (\tau - t_0). \quad (25)$$

Входящие в формулу (25) линейные потери зависят от разности температур $\tau - t_0$. В свою очередь средняя температура τ зависит от расхода теплоносителя в единицу времени. Для нахождения этих зависимостей воспользуемся выведенными выше соотношениями. Из формулы (17) найдем разность температур $t_2' - t_0$ и подставим ее в формулу (20). В результате получим:

$$\tau_2 - t_0 = (t_2 - t_0) \frac{1}{z} (e^z - 1). \quad (26)$$

Складывая теперь почленно равенства (15) и (26), найдем что:

$$\tau - t_0 = (t_1 - t_0) \frac{1}{2z} (1 - e^{-z}) + (t_2 - t_0) \frac{1}{2z} (e^z - 1),$$

или, вводя гипергеометрические функции, запишем полученный результат в виде следующей формулы:

$$\tau - t_0 = (\tau_0 - t_0) \frac{sh(z)}{z} + (t_1 - t_2) \frac{1 - ch(z)}{2z}. \quad (27)$$

Формула (25) – это условие баланса. Она связывает отпущенную источником тепла энергию с энергией, полученной потребителем, и с энергией, потерянной при передаче теплоносителя через теплотрассу. В этом смысле она полностью аналогична формуле (9). Отношение полученной энергии к отпущенной выражается через коэффициент энергетической эффективности тепловой сети, или её КПД (2). Вводя этот коэффициент в формулу (25) и подставляя в нее разность температур (27), получим критериальное уравнение эффективности тепловой сети при любом режиме

$$\eta(z, t_0) = 1 - (1 + \beta)(1 - ch(z) + 2sh(z)) \cdot \frac{\tau_0 - t_0}{t_1 - t_2}. \quad (28)$$

где: $\tau_0 = \frac{t_1 + t_2}{2}$.

Формула (28) дает зависимость эффективности сети η от температурного графика сети и от температуры окружающего воздуха (атмосферы) t_0 . Если положить η равным числу, рекомендованной стандартом СНиП 2.04.07-86 (41-02-2003) Тепловые сети, например, 0,92, то (28) превращается в уравнение, представляющее собой условие баланса, из которого находится секундный расход теплоносителя для данной температуры окружающей среды. Т.е. возможно решение важной для проектировщиков тепловых сетей обратной задачи: по заданному уровню КПД определить минимально-допустимый расход в сети (в противном случае теплоноситель «застаивается» и остывает); либо определить предельную длину транспортировки теплоносителя, при заданном его расходе, полученном из других соображений, например по отопительной нагрузке жилого района.

При прокладке тепловой сети непосредственно в грунте, вместо температуры воздуха t_0 , надо задать температуру грунта $t_{гр}$ на данной глубине, определяемую по таблицам для климатического района застройки для самого холодного (расчетного) периода года.

Выводы

Предложена обобщенная математическая модель тепловой сети, на основании которой возможно её исследование для различных методов регулирования, в т.ч. и количественно-качественного регулирования тепловой нагрузки. Тем самым можно добиться снижения тепловых потерь и добиться экономии топлива в водогрейных котлах тепловой станции, за счет совершенствования управления тепловыми сетями, что не потребует больших капиталовложений.

Получено в аналитическом виде уравнение для расчета КПД тепловой сети, что дает возможность проектным организациям оптимизировать длину передачи теплоносителя, оп-

ределять оптимальный расход горячей воды в трубопроводе и его диаметр.

Литература

1. Систер В.Г., Иванникова Е.М., Поливода Ф.А., Балалаев А.Н., Мокшанов А.С., Щербаков В.П. Разработка автономных систем энергоснабжения городов. Журн. Промышленная энергетика, 2012, № 8, с. 28-33.
2. Систер В.Г., Иванникова Е.М., Поливода Ф.А. Методы исследования и технические решения энергоэффективных тепловых сетей. Журн. Энергосбережение и водоподготовка, 2012, № 2 (76), с. 8-11.
3. Соколов Е.Я., Теплофикация и тепловые сети. М.: МЭИ, 2001.
4. Систер В.Г., Поливода Ф.А., Иванникова Е.М. Технология создания высокоэффективной системы энергосбережения с внутренними источниками электроэнергии на возвратной теплоте. Журн. Энергобезопасность и энергосбережение, 2011, № 6, с. 2-6.

Система оптимального управления процессом биосинтеза целлюлозы

к.т.н. доц. Зубов Д.В., к.т.н. Парамонов Е.А., Толчёнов А.А.

Университет машиностроения

zubov@msuie.ru

Аннотация. Производство ферментов из отходов пищевых производств имеет большую экологическую значимость, но отличается рядом трудностей, связанных с нестабильностью используемого сырья и трудностью оперативного контроля процесса ферментации. В статье предложено использовать для определения оптимального момента прекращения процесса периодически уточняемую математическую модель процесса биосинтеза фермента.

Ключевые слова: биотехнология, производство ферментов, оптимальное управление, автоматизация биотехнологических производств

Одним из существенных факторов, сдерживающих развитие животноводства и птицеводства в России, является недостаток качественного кормового белка. Источниками углеводного сырья могут служить сельскохозяйственные, бытовые отходы, отходы деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности, основным компонентом которых является целлюлоза – высокомолекулярный нерастворимый полимер глюкозы. Деструкция целлюлозосодержащих субстратов позволит утилизировать отходы пищевых и зерноперерабатывающих производств и получить кормовой продукт, обогащенный белком и незаменимыми аминокислотами. В основе биологической деградации целлюлозы лежит действие синтезируемых различными микроорганизмами целлюлолитических ферментов.

Целлюлозосодержащее сырьё (отходы пивного производства, сельского хозяйства и т.д.) подготавливаются (замачивание, пропарка, дробление, добавление питательных веществ и т.д.) и передаются в основные аппараты – ферментёры, где в среду вносятся микроорганизмы рода *Cellulomonas*, которые в ходе своей жизнедеятельности выделяют комплекс целлюлолитических ферментов (далее упоминаемых как целлюлазы), которые способствуют трансформации целлюлозы (полимера) в более простые вещества, усваиваемые микроорганизмами рода *Cellulomonas* (субстрат). Фермент выступает в качестве катализатора и не расходуется, накапливаясь в культуральной среде. Продуктом может служить как биомасса микроорганизмов (для использования в качестве кормовой добавки) так и фермент (для биоразложения отходов). Зависимость концентраций от времени приведена на рисунке 1

К сожалению, процесс трудно контролировать – состав сырья плохо стандартизировать, измерение текущего значения концентрации биомассы, субстрата и фермента осуществляется путём отбора проб и дальнейшего лабораторного исследования, которое занимает много времени и отличается существенным разбросом значений. Ведение процесса по временному