

# Инженерное оборудование зданий и сооружений

УДК 697.34

## ОБ ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТЕПЛОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

В.И. Панферов, О.Ф. Гавей

Рассматривается проблема выбора оптимальной температуры теплоносителя по критерию минимума затрат электрической энергии на перекачку и сокращения тепловых потерь при его транспортировке по теплопроводам. Задача решена до конца аналитическим методом, получена формула, позволяющая определить оптимальную температуру теплоносителя. Приведены результаты расчета оптимальной температуры для конкретных условий.

*Ключевые слова:* температурный график теплоснабжения, оптимальная температура теплоносителя, расход электрической энергии на перекачку, тепловые потери теплопроводов, стоимость энергии.

Системы централизованного теплоснабжения, являющиеся важнейшим сектором энергетики России, остаются до настоящего времени, к сожалению, самой затратной и проблемной отраслью коммунального хозяйства [1]. Помимо вопросов монтажа, наладки и автоматизации систем теплоснабжения, очень актуальной является проблема соответствия их фактических температурных и гидравлических режимов проектным. В современных условиях весьма трудно соблюсти те высокотемпературные параметры теплоносителя, для которых проектировалось большинство систем: температуры во многих сетях гораздо ниже тех значений, что требуются по проекту. Это приводит к разрегулировке и снижению качества теплоснабжения, росту затрат на эксплуатацию и т.п. Вместе с тем, как нам представляется, посредством обоснованного выбора температурного графика теплоснабжения можно было бы решить большую часть перечисленных проблем.

При этом следует заметить, что до настоящего времени нет единого общепринятого подхода к выбору температурных графиков теплоснабжения. Так довольно часто считается, что необходимо повышать температуру теплоносителя в подающих магистралях тепловых сетей. В известных работах Копьева С.Ф. и Пика М.М. [2, 3] конкретно указывалось, что оптимальная температура теплоносителя в подающих магистралях должна составлять порядка 180–200 °С и даже 250 °С. При этом учитывались такие факторы, как тип источника теплоты, цена используемого топлива, взаимосвязи и взаимовлияния совместной выработки тепловой и электрической энергии, капитальные и эксплуатационные затраты, протяженность теплотрасс и т. д. Вместе с тем, в современных условиях есть

основания считать, что перспективным направлением развития является все-таки не высокотемпературное, а низкотемпературное теплоснабжение [4–6]. В частности, в наших исследованиях было установлено, что потери теплоты при транспортировке будут наименьшими, если температура теплоносителя в подающих магистралях будет составлять порядка 100 °С [7].

Однако при этом следует иметь в виду, что для доставки потребителям требуемого количества теплоты при пониженных параметрах теплоносителя необходимо увеличить его расход. Все это потребует либо увеличения пропускной способности тепловых сетей, и, соответственно, огромных затрат на прокладку и монтаж новых тепловых трасс, либо установки более мощных сетевых насосов, что неизбежно приведет к росту расхода электрической энергии на перекачку теплоносителя. Поскольку прокладка и монтаж новых тепловых сетей является весьма трудным и весьма затратным мероприятием, то есть смысл рассмотреть задачу о поиске такой температуры теплоносителя, при которой минимальными были бы не только потери теплоты при транспортировке, но и затраты электрической энергии на перекачку теплоносителя. Минимизация потерь теплоты при транспортировке, в конечном счете, приводит к уменьшению потребного расхода теплоносителя.

Известно, что электрическая мощность  $W_э$ , необходимая для перекачки сетевой воды на расстояние 1 м, вычисляется по следующей формуле [8]:

$$W_э = \frac{0,11 \cdot k_э^{0,25}}{D^{5,25}} \cdot \frac{8G_m^3 \cdot (1 + \alpha)}{\rho^2 \cdot \pi^2 \cdot \eta_n \cdot \eta_э}, \quad (1)$$

где  $k_3$  – эквивалентная шероховатость внутренней поверхности теплопровода,  $D$  – его внутренний диаметр,  $\rho$  – плотность теплоносителя,  $G_m$  – его массовый расход,  $\eta_n$  – КПД насоса,  $\eta_3$  – КПД электродвигателя насоса  $\alpha$  – доля местных потерь давления.

Массовый расход теплоносителя  $G_m$  можно выразить через переносимую тепловую мощность (количество теплоты, переносимое теплоносителем в единицу времени через поперечное сечение теплопровода)  $W_m$ :

$$G_m = \frac{W_m}{c \cdot t}, \quad (2)$$

здесь  $c$  – удельная теплоемкость теплоносителя, а  $t$  его температура. С учетом этого формула (1) переписывается в следующем виде:

$$W_3 = 0,88 \cdot \frac{k_3^{0,25}}{D^{5,25}} \cdot \frac{W_m^3 \cdot (1+\alpha)}{c^3 \cdot t^3 \cdot \rho^2 \cdot \pi^2 \cdot \eta_n \cdot \eta_3}. \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что расход электрической энергии на перекачку зависит от температуры теплоносителя, переносимой тепловой мощности и диаметра теплопровода. Из (3), в частности, отчетливо видно, что чем выше температура теплоносителя, тем меньше при прочих равных условиях расход электрической энергии на перекачку. Поскольку переносимая тепловая мощность и диаметр теплопровода на практике – это заданные величины, то представляет интерес задача выбора температуры теплоносителя.

Потеря теплоты одним погонным метром теплопровода в окружающую среду за единицу времени определяется линейной плотностью теплового потока  $q_l$ :

$$q_l = \frac{\pi \cdot (t - t_n)}{R_l}, \quad (4)$$

где  $t_n$  – температура наружного воздуха,  $R_l$  – линейное термическое сопротивление теплопередаче [9].

Следовательно, суммарные затраты энергии (тепловой и электрической)  $W_\Sigma$ , приходящиеся на один погонный метр теплопровода, можно рассчитать по следующей зависимости:

$$W_\Sigma = W_3 + q_l = 0,88 \cdot \frac{k_3^{0,25}}{D^{5,25}} \cdot \frac{W_m^3 \cdot (1+\alpha)}{c^3 \cdot t^3 \cdot \rho^2 \cdot \pi^2 \cdot \eta_n \cdot \eta_3} + \pi \cdot (t - t_n) / R_l. \quad (5)$$

Для упрощения дальнейших выкладок введем следующие обозначения:

$$a = 0,88 \cdot \frac{k_3^{0,25}}{D^{5,25}} \cdot \frac{W_m^3 \cdot (1+\alpha)}{c^3 \cdot \rho^2 \cdot \pi^2 \cdot \eta_n \cdot \eta_3};$$

$$b = \frac{\pi}{R_l};$$

$$s = -\frac{\pi \cdot t_n}{R_l}.$$

В этом случае формулу (5) можно переписать в следующем виде:

$$W_\Sigma = \frac{a}{t^3} + b \cdot t + s. \quad (6)$$

Поставим теперь следующую задачу: найти такое значение температуры теплоносителя, при котором сумма расхода электрической энергии на его перекачку и потери теплоты в окружающую среду, приходящиеся на один погонный метр теплопровода, будет минимальной. Формально данная задача оптимизации может быть записана следующим образом:

$$W_\Sigma = \frac{a}{t^3} + b \cdot t + s \rightarrow \min_t. \quad (7)$$

Решая данную задачу методом производной, найдем, что точка, «подозрительная на экстремум», имеет следующую координату по температуре теплоносителя:

$$t = \sqrt[4]{\frac{3a}{b}}. \quad (8)$$

Для выяснения характера экстремума вычислили вторую производную  $\frac{d^2 W_\Sigma}{dt^2}$  при  $t = \sqrt[4]{\frac{3a}{b}}$  и

установили, что  $\frac{d^2 W_\Sigma}{dt^2} > 0$ , следовательно, при

$t = \sqrt[4]{\frac{3a}{b}}$  достигается минимум  $W_\Sigma$ .

Для примера расчет оптимальной температуры теплоносителя выполнили для подающего, неизолированного, наружно проложенного теплопровода в климатических условиях г. Магнитогорска. При этом полагалось, что температура наружного воздуха равна  $-34$  °С, скорость ветра – 3 м/с, переносимая тепловая мощность (мощность, отпущенная источником) 66 МВт, условный диаметр теплопровода 350 мм, эквивалентная шероховатость внутренней поверхности 0,5 мм [8], доля местных потерь давления 0,25, общий КПД насоса и его электродвигателя – 0,6. Суммарный коэффициент теплоотдачи для наружной поверхности теплопровода определялся по справочным данным [10, с. 263] и составил 15 Вт/(м<sup>2</sup>°С). Оптимальная температура теплоносителя для указанных условий равна 46,9 °С. При такой температуре теплоносителя расход электрической энергии на перекачку будет равным 260,76 Вт, а тепловые потери теплопровода составят 1333,64 Вт. При более высоких и более низких температурах теплоносителя, как это следует из таблицы,  $W_\Sigma$  возрастает. Все это действительно свидетельствует о наличии отчетливо выраженного экстремума  $W_\Sigma$  по температуре теплоносителя  $t$ .

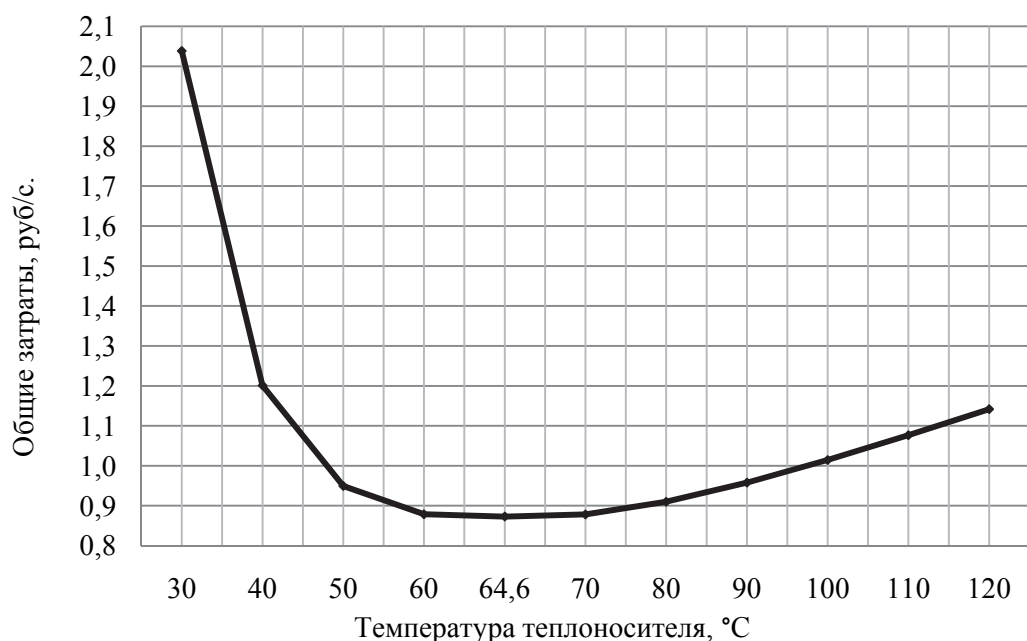
Однако в настоящее время цена электрической энергии на порядок выше цены тепловой энергии, очевидно, что учет этого приведет только к росту оптимальной температуры теплоносителя. В формулах для коэффициента  $a$  в этом случае следует добавить в виде сомножителя цену электрической энергии, а для коэффициентов  $b$  и  $s$  – цену тепловой энергии. Действительно, если учесть, что по данным ОАО «ММК» цена на электрическую энергию практически в 3,6 раза выше, чем на тепловую энергию, то расчет показывает, что оптимальная температура, вычисленная по формуле (8), равна 64,6 °С. Для иллюстрации этого факта на рисунке приведена кривая зависимости суммарных потерь денежных единиц за 1 с из-за расходов на электрическую энергию на перекачку и из-за потерь тепловой энергии в окружающую среду от температуры теплоносителя.

Понятно, тепловая изоляция теплопроводов приводит при прочих равных условиях к сокращению тепловых потерь, вследствие этого оптимальная температура теплоносителя также должна вырасти, как и в случае увеличения цены на электрическую энергию. Действительно, если для вышеуказанных условий теплопровод изолировать минеральной ватой толщиной 0,05 м с коэффициентом теплопроводности 0,045 Вт/(м·°С), то оптимальная температура теплоносителя будет равна уже 127,0 °С.

Как показали расчеты, выполненные для других условий, на повышение или понижение оптимальной температуры теплоносителя также влияют такие факторы как толщина и качество тепловой изоляции, КПД насоса и его электродвигателя, степень износа теплопроводов, доля местных сопротивлений и т. п.

Расход электрической энергии на перекачку и потеря тепловой энергии в окружающую среду

Температура теплоносителя, °С	Расход электрической энергии на перекачку, Вт	Мощность тепловых потерь в окружающую среду, Вт	Суммарные потери энергии, Вт
30	996,31	1055,04	2051,35
40	420,32	1219,89	1640,21
46,9	260,76	1333,64	1594,40
50	215,20	1384,74	1599,94
60	124,54	1549,59	1674,13
70	78,43	1714,44	1792,87
80	52,54	1879,29	1931,83
90	36,90	2044,14	2081,04
100	26,90	2208,99	2235,89
110	20,21	2373,84	2394,05
120	15,57	2538,69	2554,26



Суммарный расход денежных единиц за 1 с в зависимости от температуры теплоносителя

**Выводы.** Таким образом, установлено, что полученная в работе формула (8) действительно позволяет определить оптимальную температуру теплоносителя с точки зрения сокращения затрат энергии на перекачку теплоносителя и тепловых потерь через поверхность теплопровода. Полученные результаты рекомендуются к применению при проектировании или модернизации систем теплоснабжения на стадии выбора температурных графиков теплоснабжения, а также для анализа и оценки эффективности существующих температурных режимов систем теплоснабжения.

### Литература

1. Родионов, В.Г. Энергетика. Проблемы настоящего и возможности будущего / В.Г. Родионов. – М.: ЭНАС, 2010. – 344 с.
2. Копьев, С.Ф. Независимые открытые системы теплоснабжения с повышенными параметрами теплоносителя / С.Ф. Копьев, М.В. Сигал // Теплоэнергетика. – 1974. – № 10. – С. 62–67.
3. Пик, М.М. Выбор температурного графика регулирования отпуска тепла в системах централизованного теплоснабжения. / М.М. Пик, И.А. Смирнов, Р.Л. Ермаков // Теплоэнергетика. – 1974. – № 11. – С. 16–21.
4. Гершкович, В.Ф. Сто пятьдесят... Нормы или перебор? (Размышления о параметрах теплоносителя) / В.Ф. Гершкович // Энергосбережение. – 2004. – № 5. – С. 14–19.
5. Шелудько, Л.П. Анализ возможности сокращения «перетопа» тепловых потребителей при «изломе» температурного графика теплосети / Л.П. Шелудько // Новости теплоснабжения. – 2004. – № 05. – С. 41–44.
6. Чистович, С.А. 100-летняя история и будущее теплофикации и централизованного теплоснабжения России / С.А. Чистович // 100 лет теплофикации и централизованному теплоснабжению: сб. статей. – М.: Изд-во «Новости теплоснабжения», 2003. – С. 198–208.
7. Гавей, О.Ф. Оценка влияния температуры теплоносителя на тепловые потери теплопроводов / О.Ф. Гавей, В.И. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2012. – Вып. 15. – № 38 (297). – С. 50–54.
8. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учеб. для вузов / Е.Я. Соколов. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 472 с.
9. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 417 с.
10. Николаев, А.А. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей / А.А. Николаев. – М.: Стройиздат, 1965. – 360 с.

**Панферов Владимир Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплогасоснабжение и вентиляция», Южно-Уральский государственный университет. Тел.: (351) 2679688.

**Гавей Ольга Фёдоровна**, инженер Центра энергосберегающих технологий ОАО «ММК». Тел.: 89124040412.

---

**Bulletin of the South Ural State University  
Series “Construction Engineering and Architecture”  
2013, vol. 13, no. 1, pp. 63–66**

---

## ON OPTIMAL HEAT TRANSFER AGENT TEMPERATURE IN HEAT TRANSPORTATION SYSTEMS

*V.I. Panferov, O.F. Gavey*

The article considers the problem of choice of the optimal heat transfer agent temperature by the criterion of minimum power costs associated with pumping and reduction of heat losses while transported by heat pipelines. The problem is solved by means of analytical method. The author obtains a formula that allows determining the optimal heat transfer agent temperature. The paper gives the results of optimal heat transfer agent temperature calculation for specific conditions.

*Keywords: heat supply temperature schedule, optimal heat transfer agent temperature, pumping electric power consumption, heat pipelines heat losses, energy cost.*

**Panferov Vladimir Ivanovich**, doctor of engineering sciences, professor, head of Heat and Gas Supply and Ventilation Department, South Ural State University. Tel.: +7 (351) 2679688.

**Gavey Olga Fedorovna**, engineer of Energy-Saving Technologies Center of MМК OJSC. Tel.: +79124040412.

*Поступила в редакцию 23 января 2013 г.*