

Ф. Ф. Чаусов, Г.А. Раевская, М.А. Плетнев, канд. хим. наук (Удмуртский ГУ);
Ю.Н. Германов, канд. техн. наук (Тверской ГУ)

Условия стабильности водно-химического режима гидравлических сетей

Поддержание стабильного водно-химического режима (ВХР) является одним из актуальных вопросов эксплуатации гидравлических сетей, в частности систем теплоснабжения (ТС) и горячего водоснабжения (ГВС). Для обеспечения работоспособности систем ТС и ГВС теплоноситель (воду) подвергают очистке и химической обработке путем введения корректирующих добавок (КД). В качестве КД применяют ингибиторы накипеобразования и коррозии, поглотители кислорода и др. Концентрация КД в сети должна с заданной точностью соответствовать проектному ВХР. В случае недостаточной концентрации КД возможны коррозия металла и образование накипи. При избыточной концентрации помимо непроизводительного расхода КД возможна коррозия металла. Вода, используемая в системах ГВС, должна соответствовать требованиям, предъявляемым к качеству питьевой воды [1, 2].

В работе [3] рассмотрен вопрос о распределении некоторых КД (ингибиторов накипеобразования и коррозии) в закрытых гидравлических сетях. Показано, что при различных режимах дозирования КД (от импульсного до равномерного) в закрытой системе достаточно быстро устанавливается стабильный ВХР, который характеризуется постоянством концентрации КД по всей сети.

Вместе с тем, реальные системы ТС и ГВС имеют более или менее значительный расход воды, восполняемый соответствующей подпиткой сети. Принципиальная схема реальной системы ТС (ГВС) включает сетевой насос, который подает воду с расходом Q и концентрацией КД, равной z , в деаэра-тор (ДА). Вода из ДА с концент-

рацией КД, равной w , по подающим трубопроводам поступает к потребителям. Концентрация КД для j -го потребителя составляет y_j . Потребители отбирают воду с суммарным расходом ξQ ($\xi \leq 1$), где ξ — относительный коэффициент подпитки. Оставшаяся часть воды по обратным трубопроводам с расходом, соответственно, Q_1, Q_2, \dots, Q_N [суммарный расход $(1 - \xi)Q$] поступает на вход сетевого насоса. Сюда же поступает подпиточная вода в количестве ξQ , подаваемая подпиточной насосной станцией. Дозатор вводит в подпиточную воду КД концентрацией x . Теплообменное оборудование на схеме не показано.

Рациональный ВХР системы ТС (ГВС) должен обеспечивать:

- минимальную коррозию и отсутствие накипеобразования по всей длине сети;
- минимальный расход КД;
- минимальное количество операций по контролю ВХР;
- ПДК КД в воде систем ГВС (исключение превышения ПДК КД);
- возможность применения наиболее простого оборудования для дозирования КД.

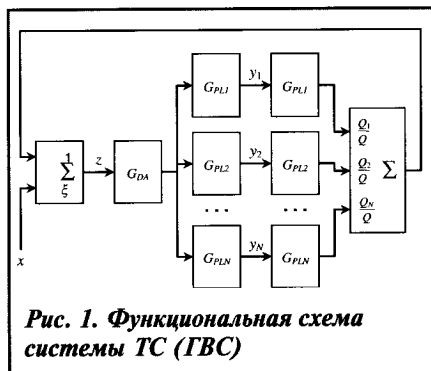


Рис. 1. Функциональная схема системы ТС (ГВС)

Для организации рационально-го ВХР на этапах проектирования, наладки, эксплуатации и реконструкции системы необходимо установить, как влияют колебания концентрации КД в линии подпитки $x(t)$ в зависимости от времени t на концентрацию КД $y_j(t)$ для j -го потребителя и какая амплитуда Δx_{\max} и период колебаний T_{\max} концентрации $x(t)$ допустимы при заданной предельно допустимой амплитуде $\Delta y_{j \max}$ колебаний $y_j(t)$.

Эти вопросы рассматриваются в данной статье.

Функциональная схема системы ТС (ГВС) приведена на рис. 1, где $G_{DA}(t)$ — функция Грина ДА; $G_{PLj}(t)$ — функция Грина j -го подающего и обратного трубопровода (подающий и обратный трубопроводы каждого потребителя конструктивно обычно идентичны).

Рассматривая ДА, можно принять как упрощение, что в резервуаре происходит идеальное перемешивание. В этом случае справедливо уравнение

$$dw/dt = [x(t) - w(t)]Q/V_{DA}, \quad (1)$$

где V_{DA} — объем воды в ДА.

По уравнению (1) легко определить функцию Грина [4] для ДА в виде

$$G_{DA}(t) = e^{-t/T_{DA}},$$

где $T_{DA} = V_{DA}/Q$ — постоянная времени ДА.

Как показано в работе [3], функция Грина для трубопровода выражается системой уравнений:

$$G_{PLj}(t) = \begin{cases} \frac{2T_{PLj}^3 \left[1 - \frac{nT_{PLj}}{(n+2)t} \right]^{2-n}}{(n+2)t^3} & \left(t > \frac{nT_{PLj}}{n+2} \right) \\ 0 & \left(t \leq \frac{nT_{PLj}}{n+2} \right) \end{cases} \quad (2)$$

где $T_{PLj} = V_{PLj}/Q$ — постоянная времени j -го трубопровода; V_{PLj} — собственный объем j -го трубопровода; n — коэффициент, зависящий от гидродинамического режима.

Согласно работе [5] для ламинарного режима $n \approx 2$, для развитого турбулентного режима $n \approx 8$. Следовательно, в частных случаях система уравнений (2) принимает вид: для ламинарного режима

$$G_{PLj}(t) = \begin{cases} \frac{T_{PLj}^3}{2t^3} & \left(t > \frac{T_{PLj}}{2} \right) \\ 0 & \left(t \leq \frac{T_{PLj}}{2} \right) \end{cases} \quad (3)$$

для развитого турбулентного режима

$$G_{PLj}(t) = \begin{cases} \frac{T_{PLj}^3}{5t^3 \sqrt[4]{\left(1 - \frac{T_{PLj}}{5t} \right)^3}} & \left(t > \frac{4}{5}T_{PLj} \right) \\ 0 & \left(t \leq \frac{4}{5}T_{PLj} \right) \end{cases} \quad (4)$$

С учетом структуры функциональной схемы (см. рис. 1) можно записать уравнение для функции $z(t)$ в форме свертки (интеграла Дюамеля) [6]:

$$z(t) = \zeta x(t) + \sum_{j=1}^N \frac{Q_j}{Q} \int_{-\infty}^{\infty} G_{PLj}(\tau_2) \times \int_{-\infty}^{\infty} G_{PLj}(\tau_1 - \tau_2) \int_{-\infty}^{\infty} G_{DA}(\tau - \tau_1) \times z(t - \tau) d\tau d\tau_1 d\tau_2, \quad (5)$$

для решения которого целесообразнее всего применить теорему об изображении свертки. В этом случае можно записать

$$Z(p) = \xi X(p) + \sum_{j=1}^N \frac{Q_j}{Q} [W_{PLj}(p)]^2 W_{DA}(p) Z(p), \quad (6)$$

где $Z(p)$, $X(p)$ — изображения Лапласа функций $z(t)$ и $x(t)$:

$$Z(p) = \int_0^{\infty} e^{-tp} z(t) dt, \quad X(p) = \int_0^{\infty} e^{-tp} x(t) dt;$$

$W_{PLj}(p)$, $W_{DAj}(p)$ — передаточные функции j -го трубопровода и ДА, определяемые по формулам:

$$W_{PLj}(p) = \int_0^{\infty} e^{-tp} G_{PLj}(t) dt; \quad (7)$$

$$W_{DA}(p) = \int_0^{\infty} e^{-tp} G_{DA}(t) dt = \frac{1}{1 + T_{DAP}}. \quad (8)$$

Решая уравнение (6) относительно $Z(p)$, получим

$$Z(p) = \frac{\xi X(p)}{1 - \sum_{j=1}^N \frac{Q_j}{Q} [W_{PLj}(p)]^2 W_{DA}(p)}. \quad (9)$$

Концентрация КД для j -го потребителя описывается сверткой вида

$$y_j(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G_{PLj}(\tau_1 - \tau_2) \times \int_{-\infty}^{\infty} G_{DA}(\tau - \tau_1) z(t - \tau) d\tau d\tau_1,$$

откуда для изображения

$$Y_j(p) = \int_0^{\infty} e^{-tp} y_j(t) dt,$$

в соответствии с теоремой об изображении свертки, получим

$$Y_j(p) = W_{PLj}(p) W_{DA}(p) Z(p). \quad (10)$$

Подставив выражение (9) в уравнение (10), получим

$$Y_j(p) = \frac{\xi X(p) W_{PLj}(p) W_{DA}(p)}{1 - \sum_{j=1}^N \frac{Q_j}{Q} [W_{PLj}(p)]^2 W_{DA}(p)}$$

Передаточная функция системы в целом (от дозатора КД на линии подпитки до j -го потребителя) определяется выражением

$$W_j(p) = \frac{Y_j(p)}{X(p)} = \frac{\xi W_{PLj}(p) W_{DA}(p)}{1 - \sum_{j=1}^N \frac{Q_j}{Q} [W_{PLj}(p)]^2 W_{DA}(p)}. \quad (11)$$

Полученное выражение для передаточной функции системы ТС (ГВС) в общем случае дает возможность анализировать частные случаи — передаточные функции систем ТС (ГВС), построенных по различным схемам, например при отсутствии ДА:

$$W_j(p) = \frac{\xi W_{PLj}(p)}{1 - \sum_{j=1}^N \frac{Q_j}{Q} [W_{PLj}(p)]^2}$$

Для однотрубной системы ГВС $\xi = 1$. В этом случае потребитель расходует всю воду, $Q_j = 0$ при всех значениях j и обратные трубопроводы отсутствуют. Передаточная функция однотрубной системы ГВС описывается формулой $W_j(p) = W_{PLj}(p) \times W_{DA}(p)$. В простейшем случае, для однотрубной системы ГВС без ДА, передаточная функция описывается формулой $W_j(p) = W_{PLj}(p)$, т.е. сводится к передаточной функции j -го трубопровода, что не противоречит здравому смыслу, так как основной частью однотрубной системы ГВС без ДА и является собственно трубопровод.

Проанализируем более внимательно выражение (7) для передаточной функции трубопровода $W_{PLj}(p)$. В случае ламинарного гидродинамического режима, при $n = 2$, подставив формулу (3) в выражение (7), получим

$$W_{PLj}(p) = \int_{T_{PLj}/2}^{\infty} e^{-tp} \frac{T_{PLj}^3}{2t^3} dt = \left(1 - \frac{T_{PLj}p}{2} \right) e^{-T_{PLj}p/2} + \frac{T_{PLj}^2 p^2}{4} E_1 \left(\frac{T_{PLj}p}{2} \right) \quad (12)$$

где $E_1(s)$ — интегральная показательная функция [7]:

$$E_1(s) = \int_s^{\infty} \frac{e^{-\sigma}}{\sigma} d\sigma = -\gamma - \ln s -$$

$$-\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n s^n}{nn!}; \quad \gamma \approx 0,577216 \text{ — постоянная Эйлера.}$$

В случае турбулентного гидродинамического режима, при $n = 8$, выражение (7) с учетом системы уравнений (4) принимает вид

$$W_{PLj}(p) = \int_0^{\infty} e^{-tp} \frac{T_{PLj}^3}{5t^{3/4} \sqrt[4]{1 - \frac{T_{PLj}}{5t}}} dt. \quad (13)$$

Для интеграла (13) не удается найти выражение в конечной форме.

Для решения поставленных в данной работе вопросов рассмотрим поведение функции $W_j(p)$ в случае чисто мнимого аргумента $p = \omega i$, где $i = \sqrt{-1}$. В этом случае $\hat{Y}_j(\omega) = Y_j(\omega i)$ и $\hat{X}(\omega) = X(\omega i)$ представляют собой спектральные функции, соответственно, $y_j(t)$ и $x(t)$, а $\hat{W}_j(\omega) = W_j(\omega i)$ — комплекснозначная функция. В случае, если $x(t)$ представляет собой гармонической колебание

$$x(t) = A e^{(\omega t + \varphi_0) i}$$

с амплитудой A , частотой ω и фазой φ_0 , то $y_j(t)$ удовлетворяет уравнению

$$y_j(t) = \hat{W}_j(\omega) x(t) = |\hat{W}_j(\omega)| A e^{[\arg(\hat{W}_j(\omega)) + \omega t + \varphi_0] i}.$$

Известно, что $|\hat{W}_j(\omega)|$ имеет физический смысл отношения амплитуды колебаний $y_j(t)$ к амплитуде колебаний $x(t)$, а $\arg(\hat{W}_j(\omega))$ имеет физический смысл сдвига фазы колебаний $y_j(t)$ относительно колебаний $x(t)$. В рамках поставленных задач имеет смысл рассматривать только $|\hat{W}_j(\omega)|$, так как для потребителей имеет значение амплитуда колебаний концентрации КД; фаза колебаний значения не имеет. На графиках функции $\hat{W}_j(\omega)$ в случае $T_{PLj} = 1$ для одиночного трубопровода при ламинарном и турбулентном гидродинамических режимах в частотном интервале $\lg \omega \in [0, 1; 100]$ можно видеть, что для всех значе-

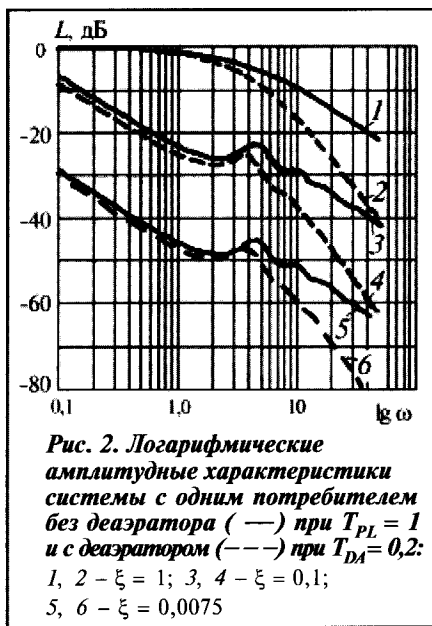


Рис. 2. Логарифмические амплитудные характеристики системы с одним потребителем без деаэратора (—) при $T_{PL} = 1$ и с деаэратором (---) при $T_{DA} = 0,2$: 1, 2 — $\xi = 1$; 3, 4 — $\xi = 0,1$; 5, 6 — $\xi = 0,0075$

ний ω величина $|\hat{W}_j(\omega)|$ при турбулентном гидродинамическом режиме не больше, чем при ламинарном. Поэтому для оценки амплитуды колебаний концентрации КД для потребителей можно принять допущение о ламинарном режиме и использовать для расчета $W_{PLj}(p)$ выражение (12), более простое по сравнению с выражением (13). Если в действительности имеет место турбулентный режим, то использование выражения (12) приведет к получению слегка завышенного значения амплитуды колебаний концентрации КД для потребителей. Такая «пессимистическая» оценка обеспечит «запас устойчивости» ВХР системы.

Для ответа на первый вопрос, поставленный в данной работе, достаточно знать функцию $|\hat{W}_j(\omega)|$. Подставив в выражение (11) формулу (8) и выражение (12), получим:

$$\begin{aligned} \hat{W}_j(\omega) &= \frac{\xi \left[\left(1 - \frac{T_{PLj} \omega i}{2} \right) e^{-T_{PLj} \omega i / 2} - \right]}{1 + T_{DA} \omega i - \sum_{j=1}^N \frac{Q_j}{Q} \left[\left(1 - \frac{T_{PLj} \omega i}{2} \right) e^{-T_{PLj} \omega i / 2} - \right]} \rightarrow \\ &= \frac{-\frac{T_{PLj}^2 \omega^2}{4} E_1 \left(\frac{T_{PLj} \omega i}{2} \right)}{\frac{T_{PLj}^2 \omega^2}{4} E_1 \left(\frac{T_{PLj} \omega i}{2} \right)^2}. \quad (14) \end{aligned}$$

На практике для исследования поведения системы удобнее использовать логарифмическую амплитудную характеристику (ЛАХ) системы [8]: $L_j(\omega) = 20 \lg |\hat{W}_{PLj}(\omega)|$. ЛАХ выражает зависимость отношения (в децибелах) амплитуды колебаний $y_j(t)$ к амплитуде колебаний $x(t)$ от частоты колебаний ω .

На рис. 2 представлены ЛАХ системы с ДА, работающей на одного потребителя. Кривая 2 соответствует однотрубной системе ГВС, для которой $\xi = 1$, $Q_1 = 0$. Можно видеть, что ЛАХ монотонно убывает с ростом ω и имеет две асимптоты. При $\omega \rightarrow 0$ $L(\omega) \rightarrow 1$ и ЛАХ имеет горизонтальную асимптоту $L = 1$. При $\omega \rightarrow \infty$ ЛАХ имеет асимптоту $L = -40 \lg \omega$, которая в логарифмических координатах изображается прямой с наклоном -40 дБ/дек, что соответствует уменьшению амплитуды в 100 раз при повышении частоты в 10 раз. Совершенно иначе выглядит ЛАХ системы ГВС, для которой объем подпитки составляет одну десятую общего объема системы (кривая 4 при $\xi = 0,1$). Рассматривая формулу (14), нетрудно убедиться в том, что и в этом случае при $\omega \rightarrow 0$ $L(\omega) \rightarrow 1$. Далее с ростом ω $L(\omega)$ убывает приблизительно как $L = -20 \lg \omega$ вплоть до $\omega = 2$. В интервале $\omega \in [2; 4]$ ЛАХ имеет подъем, обусловленный резонансом при колебаниях $x(t)$ с периодом, равным периоду циркуляции основной части воды по системе. При $\omega \rightarrow \infty$ ЛАХ также имеет прямолинейную (в логарифмических координатах) асимптоту $L = -40 \lg \omega$. Кривая 6 представляет ЛАХ системы ТС с нормативной подпиткой, составляющей 0,75 % общего объема системы ($\xi = 0,0075$) [9]. Общий характер ЛАХ в этом случае аналогичен кривой 4 со сдвигом вниз на 22,5 дБ [$20 \lg(0,0075/0,1) \approx 22,5$].

На рис. 2 представлены также ЛАХ аналогичной системы без ДА. Общий характер ЛАХ подобен системе с ДА, рассмотренной выше.

ЛАХ системы при $\xi = 0,1$ и $0,0075$ имеет несколько резонансных подъемов, выраженных более четко, чем для системы с ДА. При $\omega \rightarrow \infty$ ЛАХ имеют асимптоту $L = -20 \lg \omega$, которая в логарифмических координатах изображается прямой с наклоном -20 дБ/дек, что соответствует уменьшению амплитуды в 10 раз при повышении частоты в 10 раз.

Можно сделать вывод о том, что колебания $x(t)$ с малой частотой (значительным периодом) сильно влияют на величину $y_j(t)$. По мере повышения частоты (уменьшения периода) колебаний $x(t)$ их влияние быстро уменьшается. Однако в том случае, если период колебаний концентрации КД в линии подпитки совпадает со временем циркуляции основной массы воды по системе (или меньше этого времени в целое число раз), это приводит к существенной неустойчивости ВХР системы.

Чтобы ответить на второй поставленный в данной работе вопрос, необходимо принять решение о том, какую амплитуду $\Delta y_{j \max}$ колебаний $y_j(t)$ считать предельно допустимой. Примем, что существует определенная проектом системы концентрация КД y_0 , обеспечивающая отсутствие накипеобразования и коррозии, а также безопасная для потребителей. В этом случае можно определить предельно допустимую амплитуду колебаний $y_j(t)$ из условия

$$\Delta y_{j \max} = \min \left(\left| y_0 - y_{\text{ПДК}} \right|; \left| y_0 - y_{\text{МДН}} \right|; \left| y_0 - y_{\text{МДК}} \right| \right) \quad (15)$$

где $y_{\text{ПДК}}$ — предельно допустимая концентрация по санитарным нормам; $y_{\text{МДН}}$ — минимально допустимая концентрация по критерию начала накипеобразования; $y_{\text{МДК}}$ — минимально допустимая концентрация по критерию начала коррозии.

Определив согласно выражению (15) величину $\Delta y_{j \max}$, можно вычислить предельно допустимую амплитуду колебаний концентрации КД в трубопроводе подпитки Δx_{\max} при каждом значении частоты ω :

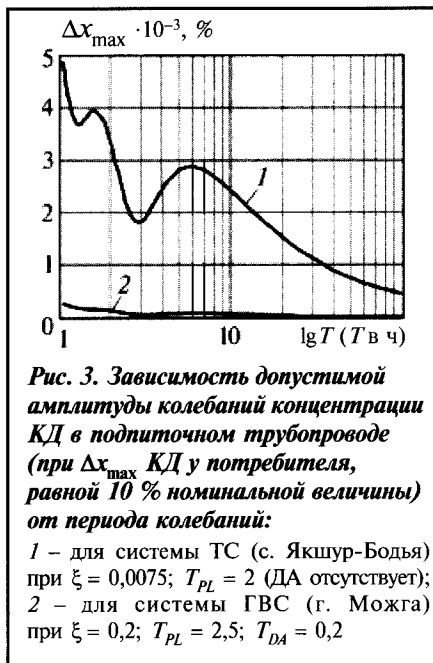


Рис. 3. Зависимость допустимой амплитуды колебаний концентрации КД в подпиточном трубопроводе (при Δx_{\max} КД у потребителя, равной 10 % номинальной величины) от периода колебаний:

1 — для системы ТС (с. Якшур-Бодья) при $\xi = 0,0075$; $T_{PL} = 2$ (ДА отсутствует);
2 — для системы ГВС (г. Можга) при $\xi = 0,2$; $T_{PL} = 2,5$; $T_{DA} = 0,2$

$$\Delta x_{\max} = \min_j \left[\frac{\Delta y_{j \max}}{\left| \hat{W}_j(\omega) \right|} \right]$$

Соответствующий период колебаний определится из известного соотношения $T = 2\pi/\omega$. Таким образом, исходя из принятой величины $\Delta y_{j \max}$, можно построить зависимость $\Delta x_{\max}(T)$.

На рис. 3 приведены примеры зависимостей $\Delta x_{\max}(T)$ для конкретных гидравлических сетей. Кривая 2 показывает зависимость для системы ГВС (г. Можга). В интервале $T < 6$ ч зависимость имеет колебательный характер, при $T > 6$ ч Δx_{\max} монотонно убывает с ростом T . Это показывает, что допустимые погрешности дозирования КД тем меньше, чем больше их период. При $T \rightarrow \infty$ величина Δx_{\max} асимптотически приближается к 10 %, т.е. к заданной величине $\Delta y_{j \max}$. Кривая 1 показывает зависимость $\Delta x_{\max}(T)$ для системы ТС (с. Якшур-Бодья). Общий характер этой зависимости такой же, как и в рассмотренном выше случае. Однако колебательный характер зависимости выражен значительно сильнее, а допустимая погрешность дозирования КД гораздо больше. Так, с периодом в 1 ч являются допусти-

мыми колебания дозирования КД до 5000 %, или до 50 раз по сравнению с номинальной величиной. Рассматривая кривые 1 и 2, можно прийти к выводу, что для обеспечения стабильного ВХР гидравлических сетей различного назначения необходимы различные типы оборудования для дозирования КД. Если для конкретного типа дозирующего оборудования известна предельно возможная величина Δx_{\max} , то по графику зависимости $\Delta x_{\max}(T)$ можно определить предельно допустимый период колебаний T_{\max} . И наоборот, если оборудование характеризуется предельно возможным периодом колебаний T_{\max} , то исследование зависимости $\Delta x_{\max}(T)$ позволяет сделать вывод о предельно допустимой величине Δx_{\max} . Вопрос о выборе типа дозирующего оборудования актуален и, по-видимому, является темой отдельной работы.

Список литературы

1. **Правила** технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. М.: СПО ОРГРЭС, 1996.
2. **СанПиН 2.1.4.559-96**. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества.
3. **Чаусов Ф.Ф., Дедюхин П.С., Бартенев О.А. и др.** Распределение ингибиторов коррозии и накипеобразования в гидравлических сетях со сложной топологической структурой // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2002. № 9. С. 46–49.
4. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973.
5. **Циборовский Я.** Основы процессов химической технологии. Л.: Химия, 1967.
6. **Жевержеев В.Ф., Кальницкий Л.А., Сапогов Н.А.** Специальный курс высшей математики для втузов. М.: Высшая школа, 1970.
7. **Справочник** по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица и И. Стигана. М.: Наука, 1979.
8. **Основы** автоматического управления / Под ред. В. С. Пугачева. М.: Наука, 1967.
9. **СНиП 2.04.07-86***. Тепловые сети.