

ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ ВЫНУЖДЕННОЙ И СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ НА ТЕПЛООТДАЧУ ПРИ ДВИЖЕНИИ ТОЛУОЛА СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ

Канд. техн. наук КЕЛБАЛИЕВ Р. Ф.

Азербайджанская государственная нефтяная академия

В ряде областей техники для повышения мощности, экономичности и эффективности работы установки, а также для охлаждения высокотемпературной поверхности аппарата при сверхкритических давлениях (СКД) применяют вещества, например толуол. Надежность работы аппаратов наряду с другими факторами зависит от интенсивности процесса теплоотдачи. Поддержание допустимого значения температуры стенки аппарата является одним из основных вопросов эксплуатации. Это особенно заметно в аппаратах, работающих при больших тепловых нагрузках и СКД вещества.

Критическое состояние вещества характеризуется исчезновением разницы между жидкостным и газовым состоянием, равенством нулю силы поверхностного натяжения и скрытой теплоты парообразования. При околокритическом состоянии теплофизические свойства вещества имеют сложный характер: теплоемкость, коэффициент объемного расширения, число Прандтля переходят через свой максимум, а плотность и вязкость резко уменьшаются.

Изменения теплофизических свойств веществ влияют на силы, действующие на движущуюся жидкость. При этом значение одной силы становится соизмеримым с другой или преобладает над ней, в результате меняется характер течения. Так, при сильном изменении плотности возникают свободная конвекция и ускорение потока. При турбулентном течении возможны интенсификация или затухание турбулентных обменов и перестройка потока. С повышением теплоемкости улучшается охлаждающая способность жидкости. Сильное увеличение удельного объема в пристеночной части потока и уменьшение его вдали от стенки могут послужить причиной возникновения пульсации давления в холодной жидкости. Кроме того, возможны разложение углеводородных жидкостей и выделение растворенных газов из жидкости при околокритическом состоянии. Все эти явления, возникающие при сильном изменении теплофизических свойств вещества, воздействуют на интенсивность теплоотдачи и соответственно на температурный режим поверхности аппаратов. Учет влияния этих и других факторов при теоретическом расчете теплоотдачи – сложная задача. Поэтому теплоотдача при СКД вещества, в основном, изучается экспериментально. В литературе имеется множество данных по теплоотдаче и температурному режиму стенки, полученных при ламинарном, переходном и турбулентном режимах движения. В качестве теплоносителя или рабочего тела использовались вода, углеводороды, двуокись углерода и другие вещества [1–10].

В результате экспериментальных исследований было установлено наличие различных режимов теплоотдачи для отдельных жидкостей при СКД, например, нормального и ухудшенного режимов – с водой и двуокисью углерода [1–6], нормального и улучшенного – с углеводородами [7, 8]. Возможность возникновения ухудшенного режима теплоотдачи с углеводородами приведена в [9, 10].

Изменения закономерностей теплоотдачи при турбулентном течении под влиянием свободной конвекции (термогравитации), ускорения потока, затухания турбулентных обменов и перестройки потока анализируются в работах Б. С. Петухова, А. Ф. Полякова и В. А. Курганова [5, 6], где рассматривается ухудшенный режим теплоотдачи на основе экспериментальных данных, полученных для двуокиси углерода и воды.

При течении теплоносителя СКД в обогреваемых трубах существует область режимных параметров, в которой теплообмен определяется совместным влиянием вынужденной и свободной конвекции. Интенсивность теплообмена зависит от воздействия этих видов конвекции. Опытные данные, полученные при подъемном движении в вертикальных трубах и СКД, определяют особенности теплообмена в случае одинакового направления свободной и вынужденной конвекции. При опускном движении в обогреваемых трубах свободная конвекция имеет направление, противоположное вынужденной. Для такого движения опытные данные по температурному режиму стенки немногочисленны и противоречивы. Так, М. Е. Шицман [1] делает вывод о значительном улучшении теплообмена при опускном движении по сравнению с подъемным. В [3, 4] указывается либо на отсутствие различия в закономерностях теплообмена при подъемном и опускном движениях, либо – раннее наступление режима ухудшения теплообмена при опускном движении воды. Условия возникновения ухудшенного режима теплоотдачи при турбулентном движении анализируются В. А. Кургановым [6].

Экспериментальные данные по теплоотдаче при СКД вещества были получены при турбулентном режиме движения, а данных при ламинарном и переходном режимах движения недостаточно. Поэтому целесообразно изучение закономерностей теплоотдачи при ламинарном, переходном и турбулентном режимах движения и СКД с одной жидкостью при различных температурах. В частности, с холодной жидкостью соответственно условиям охлаждения высокотемпературной поверхности аппарата и с нагретой жидкостью – условиям работы теплоэнергетических установок. Указанные процессы исследовались при подъемном и опускном движениях жидкости в вертикальной трубе с целью выявления влияния направлений вынужденной и свободной конвекции на теплоотдачу и соответственно на температурный режим стенки при СКД.

В качестве модельной жидкости используется толуол ($p_{кр} = 4,24$ МПа; $t_{кр} = 320,7$ °С), нашедший широкое применение в технике, и теплофизические свойства которого изучены достаточно хорошо.

Экспериментальная установка представляет собой циркуляционный контур, изготовленный из нержавеющей стали марки 1Х18Н10Т. Описание установки, методика проведения опытов и измерения отдельных величин даны в [9]. В опытах с холодной жидкостью при исследовании темпера-

турного режима стенки использовались трубы из нержавеющей стали с внутренними диаметрами $d_{\text{в}} = 2...3$ мм, толщиной стенки 0,5 мм и обогреваемой длиной $l_{\text{обог}} = 160...220$ мм, а с нагретой жидкостью – 4,00...6,30 мм и 300...1200 мм. Кривые изменения температуры стенки по длине трубы при ламинарном, переходном режимах движения толуола в вертикальных трубах представлены на рис. 1, 2. Из рис. 1 следует, что при ламинарном движении и невысоких температурах стенки изменения t_c по длине

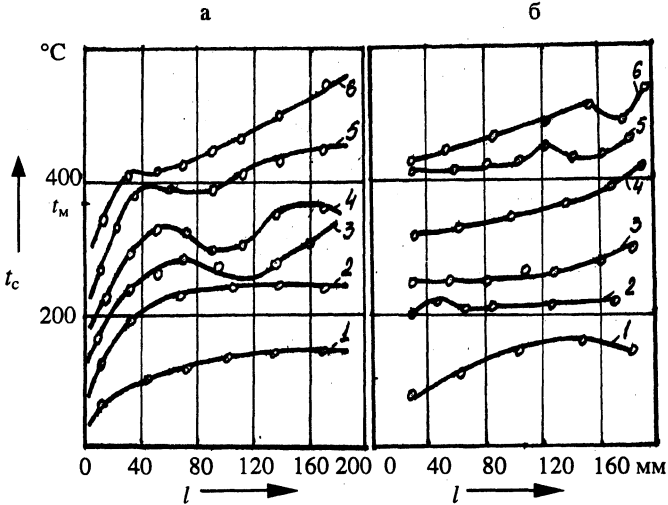


Рис. 1. Изменение температуры стенки по длине трубы при ламинарном течении толуола: а – подъемное движение; $p = 6,5$ МПа; $\rho_i = 97$ кг/(м² · с); $q \cdot 10^{-5}$ Вт/м²; 1 – 0,25; 2 – 0,70; 3 – 0,89; 4 – 1,30; 5 – 1,70; 6 – 2,45; б – опускное движение; $p = 6,5$ МПа; $\rho_i = 100$ кг/(м² · с); $q \cdot 10^{-5}$ Вт/м²; 1 – 0,30; 2 – 0,94; 3 – 1,70; 4 – 3,00; 5 – 4,00

трубы для подъемного и опускного течений имеют одинаковый характер и соответствуют закономерностям конвективного теплообмена однофазного потока (кривые 1, 2, рис. 1а, б). При $t_c > 200$ °С становится заметным влия-

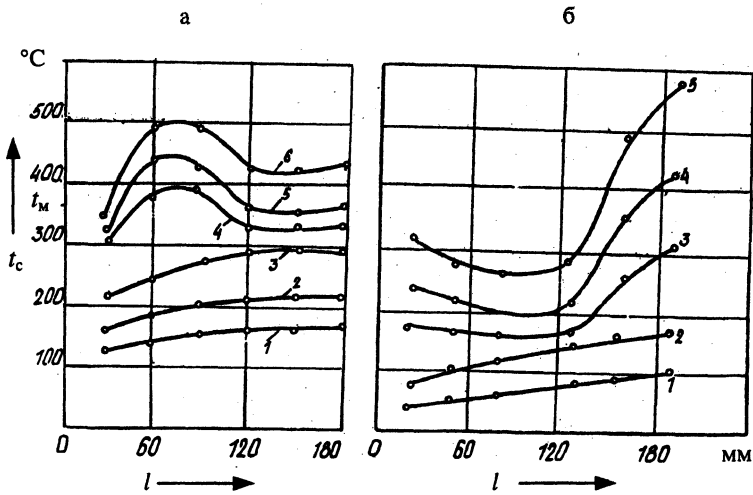


Рис. 2. Изменение температуры стенки по длине трубы при переходном течении толуола: а – подъемное движение; $p = 6,5$ МПа; $\rho_i = 1180$ кг/(м² · с); $q \cdot 10^{-5}$ Вт/м²; 1 – 1,66; 2 – 2,26; 3 – 2,9; 4 – 1,30; 5 – 5,614; 6 – 6,8; б – опускное движение; $p = 6,5$ МПа; $\rho_i = 1200$ кг/(м² · с); $q \cdot 10^{-5}$ Вт/м²; 1 – 0,77; 2 – 1,50; 3 – 2,40; 4 – 4,20; 5 – 6,70

ние направления свободной конвекции на теплоотдачу, что отражается на изменении t_c по длине трубы для подъемного и опускного движений (кривая 3, рис. 1а, б). При $t_c \approx t_m$ с увеличением теплового потока (при постоянных значениях давления, температуры и расхода жидкости) температура стенки изменяется незначительно, и отдельные участки кривых $t_c = f(l)$ сливаются между собой. В восходящих потоках при $t_c > t_m$ изменения температуры стенки имеют свои особенности (кривые 5, 6, рис. 1а). Различные характеры изменения температуры стенки по длине трубы, полученные для восходящего и нисходящего потоков при ламинарном режиме движения, могут быть объяснены влиянием направлений свободной и вынужденной конвекции на структуру потока и соответственно на интенсивность теплоотдачи.

Графики изменения температуры стенки для восходящего и нисходящего потоков при переходном режиме движения холодного толуола, представленные на рис. 2а, б, показывают, что существенные различия в указанной закономерности имеют место при $t_c \geq t_m$. В восходящих потоках при $t_c \geq t_m$ на начальном участке температура стенки увеличивается, далее по длине трубы – снижается и на конечном ее участке изменяется незначительно. В нисходящих потоках при $t_c > 200$ °С в начальной части трубы температура стенки снижается, а выше средней части – увеличивается. С ростом теплового потока возрастание температуры стенки на конечном участке трубы становится более заметным. Встречаются такие случаи, когда температура стенки увеличивается с 300 до 600 °С (кривая 5, рис. 2б).

В опытах с толуолом при турбулентном режиме движения и низких температурах немонотонное распределение температуры стенки по длине трубы наблюдается при $t_c \geq t_m$. При подъемном движении в указанных условиях наибольшее значение температуры стенки фиксируется в средней части трубы и сохраняется с увеличением теплового потока. Как при ламинарном движении, так и при турбулентном при $t_c \approx t_m$ с увеличением теплового потока температура стенки изменяется незначительно, теплоотдача интенсифицируется. Графики изменения температуры стенки, полученные для опускного движения толуола, отличаются от аналогичных для подъемного движения. Хотя опыты при турбулентном движении были проведены в трубах малого диаметра (2...3 мм) при низких температурах толуола ($t_{ж}^{вх} = 15...20$ °С) и больших массовых скоростях ($\rho u > 3000$ кг/(м² · с)), и в этих условиях заметно влияние направлений свободной и вынужденной конвекции на интенсивность теплоотдачи.

Экспериментальные данные по температурному режиму стенки показывают, что под действием свободной конвекции нарушается устойчивость ламинарного движения – вязкостный режим движения переходит в вязкостно-гравитационный, и теплоотдача интенсифицируется. Этим режимам движения соответствуют свои закономерности изменения теплоотдачи.

В опытах при ламинарном и переходном движениях холодного толуола при $p = 4,5$ МПа; $\rho u = 73$ кг/(м² · с); $t_{ж}^{вх} / t_{кр} = 0,08$; $d_n / d_b = 4,00/3,50$ мм, а также нагретого – при $p = 4,5$ МПа; $\rho u = 65$ кг/(м² · с); $t_{ж}^{вх} / t_{кр} = 0,36$; $d_n / d_b = 8,0/6,3$ мм значение $Re_{ж,d}$ увеличивалось с 1000 до 6000, а $Gr_{ж,d}$ –

с 10000 до 600000. При подъемном и опускном турбулентном течениях холодного толуола при $p = 4,5$ МПа; $\rho_{ж} = 3170$ кг/(м² · с); $t_{ж}^{вх} / t_{кр} = 0,08$; $d_{в} / d_{г} = 3,10 / 2,00$ мм соотношение $Gr_{ж,d} / Re_{ж,d}$ изменялось с 6 до 20.

Из приведенных данных следует, что в этих опытах одним из основных факторов, влияющих на интенсивность теплоотдачи при вынужденном движении, является свободная конвекция, возникающая при определенных условиях. Анализ экспериментальных данных по теплоотдаче толуола показывает, что при ламинарном движении существенное влияние свободной конвекции на вынужденную наблюдается с холодной жидкостью при $Gr_{ж,d} > 3 \cdot 10^4$, с нагретой при $Gr_{ж,d} > 10^3$, при переходном режиме движения с холодной жидкостью – при $Gr_{ж,d} > 8 \cdot 10^4$, с нагретой – при $Gr_{ж,d} > 2 \cdot 10^4$, а при турбулентном движении – при $Gr_{ж,d} > 1 \cdot 10^5$.

Влияние свободной конвекции на интенсивность теплоотдачи при вынужденном движении видно из графика изменения коэффициента теплоотдачи по длине трубы (рис. 3, 4). Из рис. 3а следует, что нормальный режим теплоотдачи по всей длине трубы сохраняется при невысоких температурах стенки (кривая 1, рис. 3а). С ростом теплового потока температура стенки увеличивается и наблюдается влияние свободной конвекции на интенсивность теплоотдачи, которое сначала имеет место в конечной части трубы, а по мере повышения теплового потока перемещается к ее началу. При этом на кривой зависимости $Nu_{ж,d}^3 = f(X)$ появляются перегибы. В начальной части трубы на участке тепловой стабилизации коэффициент теплоотдачи уменьшается, а в конечной ее части – возрастает (кривая 2, рис. 3а). С увеличением теплового потока длина участка стабилизации сначала укорачивается (кривые 3 и 4), а затем исчезает, и коэффициент теплоотдачи увеличивается по всей длине трубы (кривые 5–7, рис. 3а). Однако в опытах с толуолом при больших значениях тепловых потоков и определенных условиях улучшенный режим теплоотдачи переходит в ухудшенный, и коэффициент теплоотдачи снижается. Переход от улучшенного режима теплоотдачи к ухудшенному рассматривается в работах [9, 10].

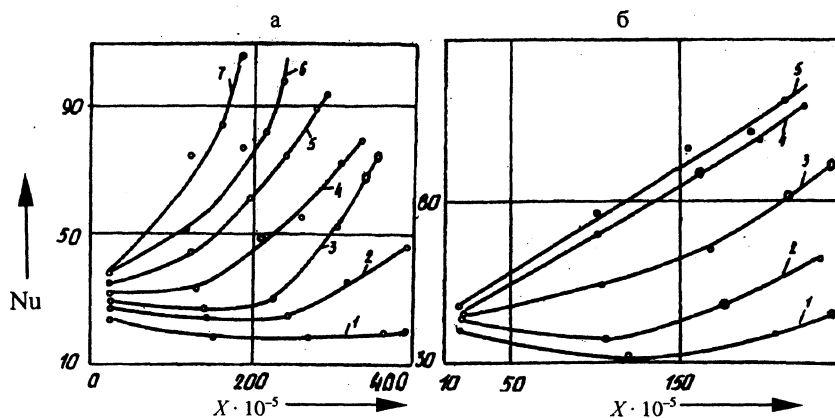


Рис. 3. Изменение числа Нуссельта по длине трубы при подъемном движении толуола: а – ламинарное течение; $p = 4,5$ МПа; $\rho_{ж} = 73$ кг/(м² · с); $t_{ж}^{вх} / t_{кр} = 0,078$; $q \cdot 10^{-5}$ Вт/м²; 1 – 0,69; 2 – 0,90; 3 – 1,18; 4 – 1,56; 5 – 1,94; 6 – 2,44; 7 – 2,90; б – переходное течение; $p = 4,5$ МПа; $\rho_{ж} = 65,4$ кг/(м² · с); $t_{ж}^{вх} / t_{кр} = 0,361$; $q \cdot 10^{-5}$ Вт/м²; 1 – 0,38; 2 – 1,01; 3 – 1,35; 4 – 1,77; 5 – 2,06

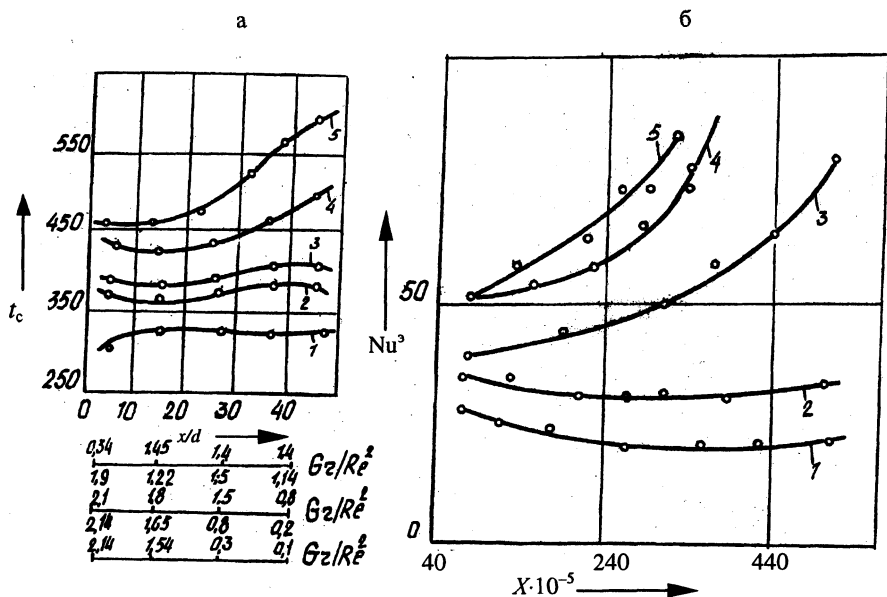


Рис. 4. Изменение температуры стенки и числа Нуссельта по длине трубы при турбулентном течении толуола: а – подъемное движение; $p = 4,5$ МПа; $\rho_i = 91$ кг/(м² · с); $t_{ж}^{вх} / t_{кр} = 0,826$; q / ρ_i кДж/кг; 1 – 0,29; 2 – 0,80; 3 – 1,04; 4 – 1,48; 5 – 1,90; б – опускное движение; $p = 4,5$ МПа; $\rho_i = 130$ кг/(м² · с); $t_{ж}^{вх} / t_{кр} = 0,530$; $q \cdot 10^{-5}$ Вт/м²; 1 – 0,12; 2 – 0,32; 3 – 0,64; 4 – 0,96; 5 – 1,30

Отметим, что по длине трубы могут иметь место несколько режимов теплоотдачи. Так, при небольших величинах температур стенки и теплового потока по длине трубы наблюдался только нормальный режим теплоотдачи, при температурах $t_c \approx t_m$ в начальной части трубы – нормальный, а выше средней части – улучшенный режим. С ростом теплового потока создаются также условия, при которых в начальной части трубы фиксируются нормальный, в средней – улучшенный, а в конечной – ухудшенный режимы теплоотдачи. С нагретой жидкостью при больших тепловых потоках и температурах стенки по длине трубы встречаются улучшенные и ухудшенные режимы теплоотдачи. Установленные закономерности подтверждаются в опытах с нагретой жидкостью и при переходном режиме движения (рис. 36).

Графики изменения теплоотдачи по длине трубы при турбулентном режиме движения нагретого толуола представлены на рис. 4, где показаны изменения величин Gr/Re^2 по длине трубы при различных значениях q/ρ_i . Как следует из рис. 4а, при $q/\rho_i \leq 1,0$ по всей длине экспериментальной трубы $Gr/Re^2 > 0,6$ (кривые 1–3). По мере увеличения теплового потока при постоянной массовой скорости величина q/ρ_i возрастает и наступает такой режим, при котором в начальной части трубы $Gr/Re^2 > 0,6$, а выше средней – $Gr/Re^2 < 0,6$. В этих опытах во входной части трубы теплоотдача улучшается, а в выходной – ухудшается (кривые 4, 5).

Определенный интерес представляют данные по теплоотдаче, полученные при опускном движении нагретой жидкости в вертикальной трубе. На рис. 4б представлены результаты одного из таких опытов для турбулентного режима движения нагретого толуола в трубе диаметром $d_n / d_b =$

= 8,0/6,3 мм и обогреваемой длиной 1200 мм. Из графиков следует, что при подъемном и опускном движениях под влиянием свободной конвекции теплоотдача изменяется.

Результаты экспериментального исследования теплоотдачи при ламинарном, переходном и турбулентном режимах движения и СКД толуола показывают, что интенсивность теплоотдачи зависит от многих факторов. Таковыми являются изменение теплофизических свойств веществ и эффекты, возникающие при этом (изменение сил, действующих на движущуюся жидкость, свободная конвекция, ускорение потока, интенсификация или затухание турбулентных обменов, перестройка потока), а также термоакустические автоколебания давления, выделение растворенных газов из состава жидкости, разложение углеводородов и др. При определенных условиях на отдельных участках длины трубы наблюдается влияние одного или нескольких факторов на теплоотдачу. Например, при турбулентном течении холодного толуола и $t_c < t_m$ по всей длине трубы имеет место нормальный режим теплоотдачи. При температурах $t_c \geq t_m$ нормальный режим сохраняется на начальном участке трубы, а в остальной ее части под влиянием изменений теплофизических свойств жидкости, свободной конвекции и пульсации давления теплоотдача улучшается. Здесь не исключено влияние и других эффектов. При температурах $t_c \geq 500$ °С в рассматриваемом процессе основную роль играют термоакустические автоколебания давления, под действием которых возникает улучшенный режим теплоотдачи [8]. С нагретым толуолом при $t_c \geq t_m$ под влиянием свободной конвекции (основной фактор) теплоотдача сначала улучшается, затем с ростом теплового потока на определенных участках трубы (обычно выше средней ее части) улучшенный режим теплоотдачи переходит в ухудшенный [9, 10]. Доминирующее влияние свободной конвекции на интенсивность теплоотдачи СКД толуола наблюдается при ламинарном режиме движения при $t_c \geq 200$ °С, а при турбулентном – от $t_c = t_m$ до $t_c \approx 500$ °С.

Обозначения

t – температура, °С; p – давление, МПа; q – тепловой поток, Вт/м²; u – скорость, м/с; ρ – плотность, кг/м³; ρu – массовая скорость, кг/(м² · с);

d – диаметр, мм; l – длина, мм; x – расстояние от входа трубы, мм; $X = \frac{l x}{Re d}$ –

безразмерное расстояние от входа трубы; t_m – температура, соответствующая максимуму теплоемкости при СКД вещества, °С; Re , Pr , Nu , Pe , Gr – числа Рейнольдса, Прандтля, Нуссельта, Пекле, Грасгофа.

Индексы: с – стенка; ж – жидкость; вх – вход; обог – обогреваемая; кр – критическая; в – внутренний; н – наружный.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ш и ц м а н М. Е. Особенности температурного режима в трубах при сверхкритических давлениях // Теплоэнергетика. – 1968. – № 5. – С. 57–61.

2. В и х р е в Ю. В., Б а р у л и н Ю. Д., К о н ь к о в А. С. Исследование теплообмена в вертикальных трубах при сверхкритических давлениях // Теплоэнергетика. – 1967. – № 9. – С. 80–82.

3. Алферов И. С., Балунов Б. Ф., Рыбин Р. А. К вопросу об ухудшении теплоотдачи в области сверхкритических параметров состояния жидкости // Тепло- и массоперенос. – Мн.: Наука і тэхніка, 1972. – Т. 2. – Ч. 1. – С. 37–42.

4. Орнатский А. П., Глущенко Л. Ф., Калачев С. И. Теплоотдача при подъемном и опускном движении воды в трубах малого диаметра при сверхкритических давлениях // Теплоэнергетика. – 1971. – № 5. – С. 91–93.

5. Петухов Б. С., Генин Л. Г., Ковалев С. А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 470.

6. Курганов В. А. Теплообмен и сопротивление в трубах при сверхкритических давлениях теплоносителя // Теплоэнергетика. – 1998. – № 3. – С. 2–10; № 4. – С. 35–44.

7. Калбалиев Ф. И., Бабаев Ф. К. Теплоотдача в начальном термическом участке при ламинарном течении и сверхкритических давлениях толуола // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1984. – № 4. – С. 90–94.

8. Келбалиев Р. Ф. Исследование улучшенного режима теплоотдачи при сверхкритических давлениях жидкости // Проблемы энергетика. – 2001. – № 2. – С. 61–66.

9. Келбалиев Р. Ф. Температурный режим парогенерирующих труб при околокритических давлениях вещества.: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Баку, 1998. – 24 с.

10. Келбалиев Р. Ф. Ухудшение теплообмена при сверхкритических давлениях вещества // ИФЖ. – 2001. – Т. 74. – № 2. – С. 115–118.

Представлена кафедрой
промышленной теплоэнергетики
и технологии воды

Поступила 22.05.2001

УДК 621.31

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ*

Инж. СТЕПАНОВ С. В.

ЗАО «Сиброн» (Иркутск)

Большинство методов прогнозирования основано на принципах и технике статистического анализа временных рядов различных показателей энергопотребления – суммарных объемов, удельных затрат энергии в целом или каждого энергоносителя в отдельности. Сюда относятся методы экстраполяции, парной и множественной корреляции, международных сравнений. Они характеризуются малой степенью детализации, отличаются простотой и возможностью использования для них стандартных вычислительных программ.

Методы экстраполяции динамических рядов, о которых будет идти речь, основаны на переносе событий и состояний из прошлого в будущее. Считается, что процесс энергопотребления характеризуется значительной

* Публикуется в порядке обсуждения. – *Ред.*