

Пластинчатые теплообменники – дело тонкое

О.В.Жаднов, заместитель главного инженера, ООО «Нижегородтеплогаз»

О влиянии загрязнений и конструктивных особенностей пластинчатых теплообменников на коэффициент теплопередачи (или о чем умалчивают производители)

Влияние загрязнения. Каждому теплоэнергетику с институтской скамьи известно, что накипь на поверхности нагрева теплообменника увеличивает термическое сопротивление теплопередающей стенки и, следовательно, снижает коэффициент теплопередачи аппарата. Так как, коэффициент теплопроводности накипи имеет весьма низкое значение, то даже незначительный слой отложений создает большое термическое сопротивление (слой котельной накипи толщиной 1 мм по термическому сопротивлению примерно эквивалентен 40 мм стальной стенки [2]).

Однако один и тот же по толщине и химическому составу слой накипи оказывает существенно разное влияние на тепловую эффективность теплообменных аппаратов, различных по конструкции и режимам работы.

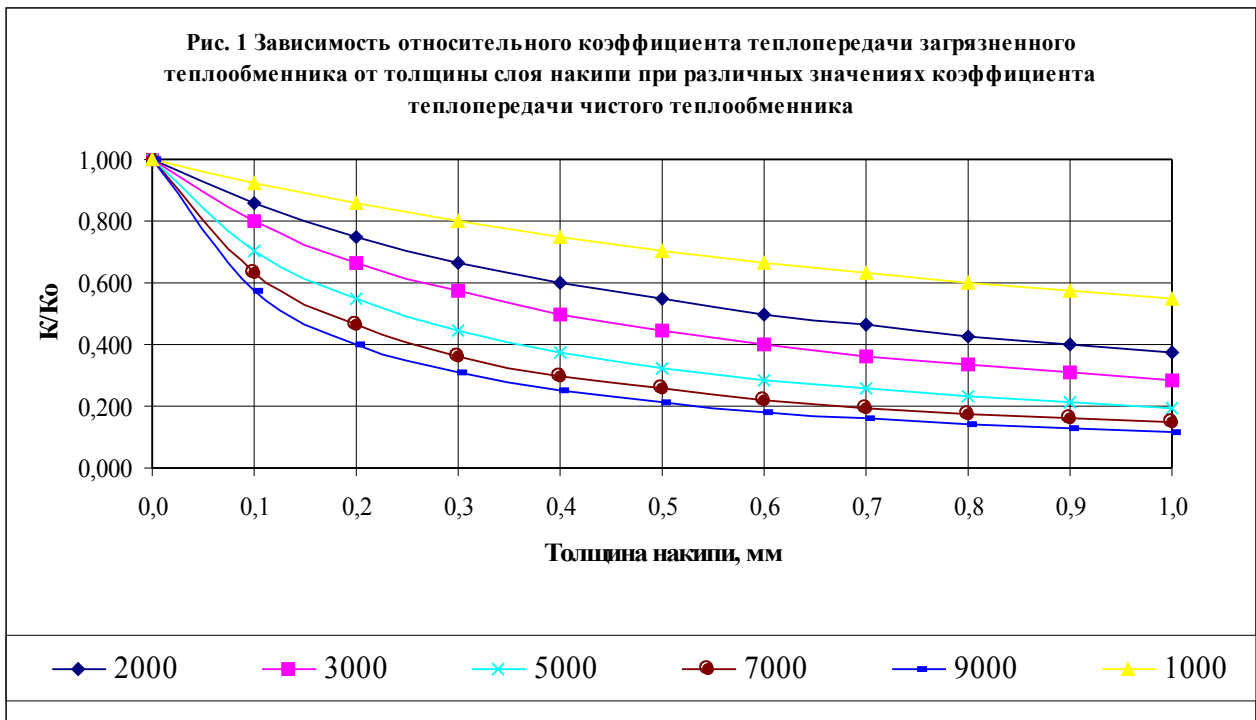
Тепловая эффективность загрязненного теплообменника по отношению к такому же теплообменнику с чистой поверхностью характеризуется отношением коэффициентов теплопередачи (k/k_0), которое согласно [2] определяется по формуле:

$$\frac{k}{k_0} = \frac{1}{1 + k_0 \times \frac{\delta_{\text{накип}}}{\lambda_{\text{накип}}}} \quad -1$$

где $\delta_{\text{накип}}$, $\lambda_{\text{накип}}$ – эквивалентная толщина слоя отложений и его коэффициент теплопроводности.

На рис.1 представлены графики зависимости относительной тепловой эффективности загрязненного теплообменного аппарата от толщины слоя накипи при различных значениях коэффициента теплопередачи чистого теплообменника (коэффициент теплопроводности накипи принят $1,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$).

Необходимо заметить, что реальная картина загрязнения для пластинчатого теплообменника



(ПТО) существенно отличается от теоретической. На практике обнаруживается неравномерное загрязнение пластин и отдельных каналов по ширине, длине и высоте подогревателя, что связано, очевидно, с неравномерностью полей температур и скоростей теплоносителя. Значительную сложность представляет также корректное определение коэффициента теплопроводности накипи, который согласно [2] в зависимости плотности и химического состава отложений изменяется в широких пределах $0,13-3,14 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Тем не менее, из показанных на рис. 1 зависимостей можно извлечь важное следствие, а именно: теплообменник с высоким расчетным (конструктивным) значением коэффициента теплопередачи (k_0) значительно более чувствителен к загрязнению, чем теплообменник с низким расчетным коэффициентом

том теплопередачи (т.е. его коэффициент теплопередачи при одном и том же загрязнении уменьшается на большую долю).

Действительно, традиционно применявшиеся в отечественной теплоэнергетике кожухотрубные водоподогреватели (с гладкими трубками), как известно, выбирались с невысоким коэффициентом теплопередачи в расчетном режиме – на уровне 800-1200 Вт/(м²·°С). При толщине слоя накипи $\delta_{\text{накип}} = 0,3$ мм такой теплообменник имеет относительную тепловую эффективность $(k/k_0) = 0,8$, что вполне приемлемо.

Иначе обстоит дело с пластинчатыми аппаратами, которые, как правило, из соображений экономии выбираются с высоким расчетным коэффициентом теплопередачи – 5000-7000 Вт/(м²·°С). При той же толщине слоя накипи $\delta_{\text{накип}} = 0,3$ мм этот теплообменник уже будет иметь отношение $(k/k_0) = 0,4$ т.е. коэффициент теплопередачи, заявленный изготовителем, снизится в 2,5 раза!

Учитывая повсеместно низкое качество водопроводной воды в городах России (по сравнению с Европой) и безалаберное отношению к водоподготовке (особенно в коммунальном секторе), становится понятно, к каким негативным последствиям может привести непрофессиональный подход к проектированию и применению «экономически выгодных» теплообменных аппаратов.

Влияние конструкции. Необходимо отметить, что за период своей профессиональной деятельности автору статьи ни на одном из обследованных ПТО не удалось зафиксировать расчетного (проектного) коэффициента теплопередачи (о методике испытаний теплообменников см. ниже в разделе 4). Даже для новых ПТО, работающих на достаточно мягкой и чистой воде, относительный коэффициент теплопередачи (k/k_0) не превышал 0,9. При этом была отмечена интересная особенность ПТО – при значительной разнице давлений между полостями греющего и нагреваемого теплоносителей (2-3 кгс/см²) относительный коэффициент теплопередачи существенно ухудшался и составлял всего лишь 0,7-0,8. Как оказалось, данный эффект объясняется «распуханием» полости с большим давлением, и, соответственно, сжатием полости с меньшим давлением вследствие прогиба пластин. В «распухшей» полости, по-видимому, возникает зазор между ребрами рифления соседних пластин, который приводит к нарушению равномерности распределения теплоносителя по ширине пластин. На одном теплообменнике марки «APV» даже проводился опыт по определению относительного изменения внутреннего объема сжатой полости – оно составило около 10%.

Возможность некоторого прогиба пластин с образованием зазора следует также из того общеизвестного факта, что производители ПТО в технической документации всегда указывают некоторый диапазон размера затяжки пакета пластин, например 345-350 мм, т.е. новый ПТО обтягивается до 350 мм, с течением времени (из-за старения прокладок) требуемый размер затяжки уменьшается до минимума – 345 мм. Во всяком случае, вышеуказанные особенности ПТО требуют дополнительного исследования.

Актуальность проблемы борьбы с загрязнениями

Многие специалисты отмечают потерю тепловой эффективности ПТО в процессе эксплуатации вследствие загрязнения поверхности нагрева. Например, коллеги из г. Санкт-Петербурга в статье [6] приводят следующую статистику потери тепловой эффективности теплообменника Альфа-Лаваль, установленного на ЦТП:

- после 1-ого года эксплуатации - 5%;
- после 2-ого - 15%;
- после 3-его - более 25%.

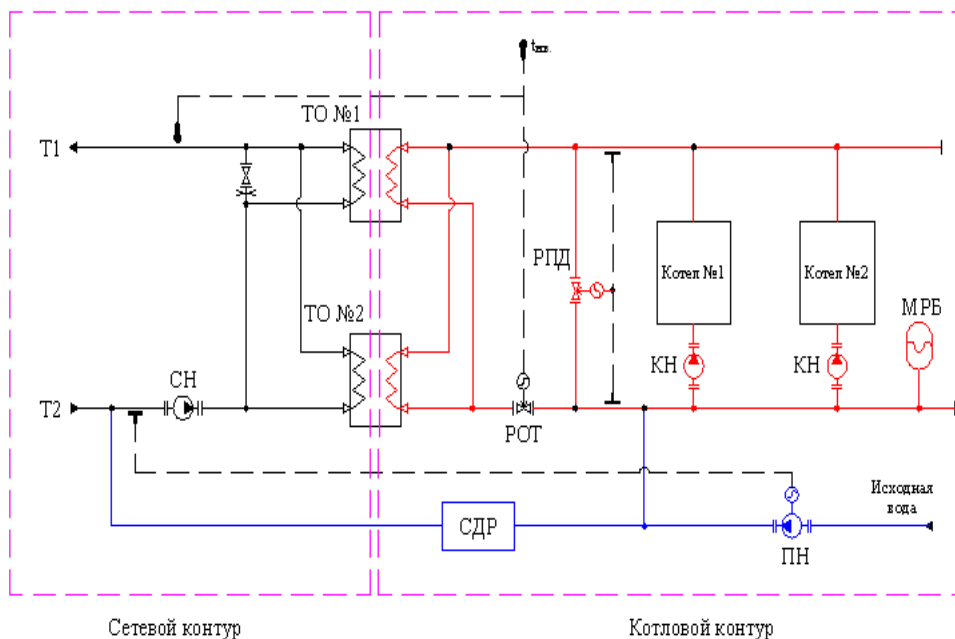
Нам в своей деятельности пришлось многократно сталкиваться с сильнейшим загрязнением ПТО, при котором теплообменник терял до 50-70% тепловой эффективности за 3-6 недель!

На нашем предприятии эксплуатируется достаточно большой парк – более 50 единиц – водо-водяных ПТО различных фирм производителей («Альфа-Лаваль Поток», «РИДАН», «Машимпекс», «Funke») единичной тепловой мощностью 0,3-8,0 МВт. Водоподогреватели установлены в отопительных котельных, расположенных в двух городах Нижегородской области: г. Дзержинск и г. Сергач.

В 2001-2002 гг. в указанных городах с привлечением инвестиций ОАО «ГАЗПРОМ» была проведена масштабная реконструкция систем теплоснабжения, в результате которой взамен старых отопительных котельных с чугунно-секционными котлами («Энергия», «Тула» и др.) были построены и реконструированы: в г. Дзержинск – 18 котельных общей установленной мощностью 158,5 МВт, в г. Сергач – 8 котельных общей установленной мощностью 32,5 МВт. В г. Дзержинске, кроме того, произведена замена 100% тепловых сетей от реконструированных котельных суммарной протяженностью 36 км. Все котельные в настоящее время работают в автоматическом режиме (без постоянного присутствия обслуживающего персонала). Котельные выполнены по единой 2-х контурной технологической схеме (см. рис. 2). Пластинчатые теплообменники отопления (2 шт. по 50% производительности каждый) выполняют функцию разделения контуров. Расчетный температурный график: 95/70 °С – по сетевому контуру, 110/80 °С – по котловому контуру.

Внутренний (котловой) контур заполнен химически очищенной водой с жесткостью не более 200 мкг-экв/кг. При отсутствии утечек во внутреннем контуре и исправной работе системы компенсации температурных расширений, выполненной на базе мембранных расширительных баков (МРБ), подпитка

контура практически не требуется, что обеспечивает отсутствие накипеобразования и коррозии на поверхностях нагрева котлов и теплообменников (со стороны котлового контура).



- РОТ - регулятор отощения;
- РПД - регулятор перепада давления;
- КН - котловой насос;
- МРБ - мембранный расширительный бак;
- ТО - теплообменник;
- СН - сетевой насос;
- ПН - подпиточный насос;
- СДР - система дозирования реагента.

Рис. 2. Технологическая схема котельных

Внешний (сетевой) контур подпитывается водой, в которую непрерывно дозируется реагент - ингибитор накипиобразования и коррозии (марки «Аква-М» или ОЭДФ-Zn). Дозирование осуществляется установкой СДР-5 (изготовитель – ОАО «Аква-Хим», г. Тверь).

Непосредственно в процессе пуска в эксплуатацию и в последующих отопительных сезонах 2001-2003 г. наше предприятие столкнулось с серьезными трудностями, выразившимися в невозможности передачи требуемого количества тепла через ПТО и, следовательно, в невозможности поддержания проектного температурного графика в тепловых сетях ряда котельных при низких температурах наружного воздуха – приблизительно при -15°C и ниже. Как показало проведенное обследование, причина заключалась в интенсивном загрязнении поверхности нагрева теплообменников по сетевой стороне продуктами коррозии железа (г. Дзержинск) и накипью (г. Сергач). В качестве иллюстрации на рис. 3 представлена фотография образца отложений, извлеченного из теплообменника в г. Сергач, на рис.4 – фотография пластины, извлеченной из теплообменника в г. Дзержинске.



Рис. 3. Образец отложений, извлеченный из пластинчатого теплообменника (г. Сергач)



Рис. 4. Образец слоя железистых отложений на пластине (г. Дзержинск)

Загрязнение теплообменников также оказывало негативное влияние на гидравлический режим тепловых сетей. При расчетном гидравлическом сопротивлении теплообменников $0,4 \text{ кгс/см}^2$, фактическое его значение достигало $2,0-2,5 \text{ кгс/см}^2$, после чего теплообменники поочередно подвергались разборке и механической чистке. Механическая очистка пластинчатого теплообменника оказалась сложной и длительной по времени операцией (очистка 1 теплообменника бригадой из 3-х человек занимала 6-8 ч.), что в условиях отопительного сезона приводило к ограничению подачи тепла потребителям.

Ситуация усугублялась также тем обстоятельством, что из-за большого расхода подпитки (до 10 раз больше норматива) длительное время не удавалось наладить надежное функционирование систем реагентной водоподготовки. Качество сетевой воды в первый год эксплуатации не отвечало никаким нормам и на ряде котельных было таким, что теплообменники загрязнялись в течение 2-3 недель.

Нескончаемый поток жалоб от потребителей поставил под сомнение саму идею реконструкции котельных, в ходе которой производилась замена устаревшего оборудования – чугунно-секционных котлов на современные автоматизированные жаротрубные котлоагрегаты, пластинчатые теплообменники и пр.

Опыт борьбы с загрязнениями пластинчатых теплообменников

В сложившихся условиях с февраля 2002 г. на предприятии была развернута планомерная работа по анализу причин нарушений в работе теплообменников и разработке мероприятий по стабилизации теплового и гидравлического режимов отпуска тепловой энергии.

На первом этапе был организован непрерывный мониторинг химического состава исходной и сетевой воды по основным показателям (прозрачность по шрифту, содержание железа, pH, жесткость, концентрация реагента и др.), налажен контроль состояния загрязненности теплообменников по простейшему показателю – перепаду давления.

Анализ полученной информации по результатам работы в отопительных сезонах 2001-02 гг. и 2002-03 гг. позволил сделать выводы об истинных причинах, приводящих к быстрому загрязнению пластинчатых теплообменников.

В г. Сергач исходная, а, следовательно, и сетевая вода, имеет высокую жесткость (15-20 мг-экв/кг). Этим определяется ее высокая склонность к накипеобразованию и сравнительно низкая коррозионная агрессивность (индекс стабильности положительный). При этом исходная вода прозрачна, не содержит большого количества механических примесей и железа. Вследствие низкой интенсивности процессов коррозии трубопроводы теплосетей и внутренних систем отопления не загрязнены большим количеством железо-окисных отложений, скопившихся за предыдущий период эксплуатации.

Поэтому, отложения на поверхностях нагрева твердые, от светло-серого до коричневого цвета, состоят на 80% из карбоната кальция с вкраплениями твердых частиц продуктов коррозии железа. Толщина слоя отложений достигала 0,6-0,8 мм. Скорость образования отложений достаточно высока - за 1,5-2 месяца достигался критический перепад давления по сетевой стороне - 2,5 кгс/см².

Ситуация в г. Дзержинске кардинальным образом отличалась. Исходная водопроводная вода в г. Дзержинске – относительно мягкая (общая жесткость 4,0-5,0 мг-экв/кг), периодически наблюдается значительное превышение санитарных норм по содержанию железа (до 2-3 мг/кг). При pH = 6,5-7,5 и нагревании до рабочей температуры в теплосети такая вода сохраняет отрицательный индекс стабильности, т.е. является коррозионно-агрессивной (при невысокой склонности к накипеобразованию).

За предшествующий период эксплуатации (более 30 лет) в системах теплоснабжения абонентов и теплосетях скопилось огромное количество продуктов коррозии железа и других механических примесей. К этому необходимо добавить то обстоятельство, что жилищно-эксплуатационные организации традиционно (по крайней мере, предшествующие 5-10 лет) практически не готовили жилой фонд к зиме, т.е. такие важные операции, как опрессовка и промывка внутренних систем отопления (ВСО) практически не проводились.

После ввода в эксплуатацию реконструированных котельных, наладки гидравлического режима теплосетей, поток загрязнений из ВСО хлынул в сеть, что привело к быстрому загрязнению пластинчатых теплообменников.

Типичная динамика изменения прозрачности сетевой воды в системах теплоснабжения г. Дзержинска представлена на рис. 5.



Отложения на поверхностях нагрева ПТО в г. Дзержинске имеют ярко выраженный железо-окисный характер: рыжего цвета; слой, прилегающий к поверхности пластин – твердый, прочно сцеплен с металлом пластины; наружный слой – рыхлый, при высыхании образует тонкодисперсную пыль. Средний состав отложений: оксиды железа – 80-90%; карбонат кальция – 5-10%; оксид кремния и др. – 5-10%.

Эквивалентная толщина слоя отложений - 0,3-0,7 мм.

На основании анализа всей имеющейся информации были разработаны мероприятия по стабилизации работы систем теплоснабжения и теплообменного оборудования котельных г. Дзержинска и г. Сергач с учетом местной специфики. Мероприятия сведены в табл. 1.

Таблица 1. Комплекс мероприятий по повышению общей надежности и качества тепло-снабжения и снижению загрязнения поверхностей нагрева ПТО отопления.

№ п/п	Задачи	Мероприятия	Внедрение	
			г. Дзержинск	г. Сергач
1	Повышение оперативности и качества очистки ПТО от отложений. Продление ресурса эксплуатации ПТО (пластин и прокладок).	а) Внедрение методов безразборной химической промывки, отработка технологии промывки.	+	+
		б) Приобретение (изготовление) промывочных установок.	+	+
2	Стабилизация гидравлического режима, снижение расхода подпиточной воды теплосети.	а) Гидравлический расчет и наладочные работы на теплосетях.	+	-
		б) Ремонт сетей, ежегодные гидравлические испытания, поиск и устранение утечек.	+	+
		в) Штрафные санкции, отключение потребителей, допустивших утечки на теплосетях и ВСО.	+	+
3	Снижение коррозии теплосетей и ВСО, накипеобразования на поверхностях нагрева теплообменников	а) Обеспечение бесперебойной работы установок реагентной водоподготовки СДР-5.	+	+
		б) Исключение случаев подпитки сетей сырой водой.	+	+
		в) Коррозионные испытания, корректировка состава и концентрации реагентов в зависимости от полученных результатов.	+	+
		г) Применение акустических противонакипных устройств (АПУ).	-	+
4	Снижение выноса продуктов коррозии и других механических примесей из внутренних систем теплоснабжения.	а) Применение жестких мер по обеспечению выполнения потребителями предписаний по подготовке их сетей и ВСО к отопительному сезону (промывка, опрессовка).	+	+
		б) Налаживание оперативного взаимодействия с ЖЭУ по проведению переключений в сетях (исключение гидравлических ударов).	+	+
5	Очистка сетевой воды от тонкодисперсных механических примесей (продукты коррозии железа, глина и пр.)	а) Монтаж осветлительных фильтров марки ФОВ с засыпкой кварцевым песком.	+	-
		б) Монтаж инерционно - гравитационных грязевиков типа ГИГ.	+	-
6	Мониторинг состояния загрязненности ПТО с целью прогнозирования ресурса работы до очередной очистки (хим. промывки).	Разработка и внедрение методов компьютерной диагностики состояния загрязненности поверхности пластинчатых теплообменников.	+	+

Реализация мероприятий, перечисленных в табл. 2, планомерно проводилась в период с 2002 по 2004 гг. и в настоящее время в основном закончена. Так, в отопительном сезоне 2002-2003гг были полностью завершены наладочные работы на тепловых сетях всех 18 котельных г. Дзержинска. Начиная с 2002 г. в летний период стали проводиться гидравлические испытания теплотрасс на прочность и плотность, что позволило существенно сократить объем подпиточной воды. К окончанию отопительного сезона на 2003-2004 гг. удалось снизить расход подпиточной воды по котельным г. Дзержинска в 2,5 раза, по котельным г. Сергач в 3 раза.

В рамках данной статьи мы остановимся на некоторых аспектах этой деятельности, а также дадим рекомендации, представляющие на наш взгляд наибольший интерес для специалистов.

Опыт проведения химических промывок ПТО

В 2002-2003 гг. на предприятии отлаживались процедуры проведения химических промывок ПТО. Были сконструированы и изготовлены 2 установки для химической промывки оборудования (рис. 6). Весь парк теплообменников оснащен патрубками Ду 40 с запорной арматурой для присоединения промывочной установки. Разработаны и внедрены технологии промывки с использованием различных моющих составов.

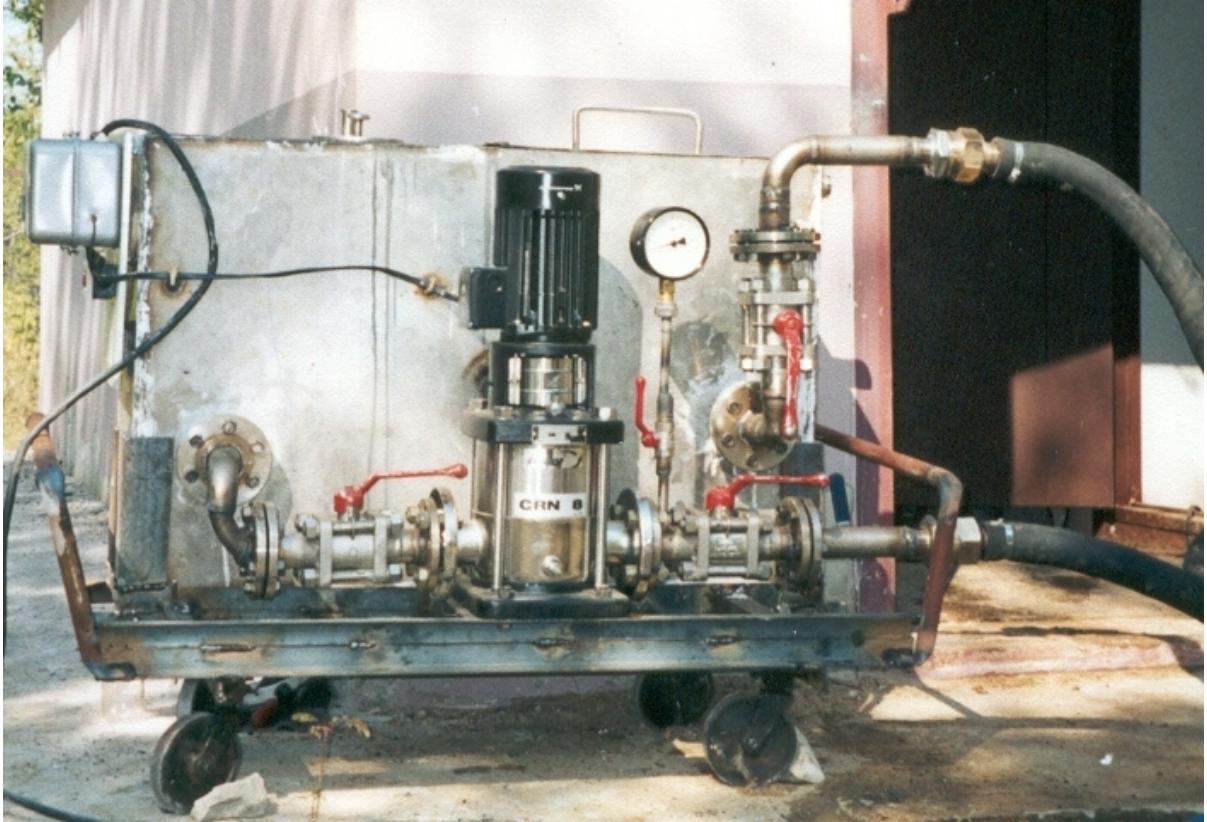


Рис.6. Установка для химической промывки теплообменников

Сложность подбора реагентов заключалась в том, что необходимо было подобрать реагент комбинированного действия, одинаково эффективно отмывающий карбонатную накипь и оксиды железа. Промывочный раствор также должен содержать ингибиторы, предохраняющие металлические поверхности нагрева теплообменников (нержавеющая сталь AISI 316) и подводящие патрубки от коррозионного износа при промывках. На основании полученного опыта мы можем рекомендовать к применению следующие химреагенты комбинированного действия:

Наименование реагента	Параметры моющего раствора	
	Концентрация реагента, %	Температура, °С
Кислотный реагент ВП-1с с ингибитором коррозии нержавеющей стали И-55 (ООО «Аква-Хим», г. Тверь)	10	50-55
Трилон-Б с подкислителем ВП-1с	10	50-60
Сульфаминовая кислота	5	85-95
Азотная кислота	4	50-55

К недостаткам метода безразборной химической промывки ПТО следует отнести:

1. Сравнительно высокую стоимость, выражающуюся в затратах на реагенты и оплату труда квалифицированного персонала. По нашим оценкам, себестоимость химической промывки одного ПТО тепловой мощностью 4-6 МВт составляет 6-10 тыс. руб.
2. Большие затраты времени и трудозатраты. Химическая промывка одного ПТО со всеми сопутствующими процедурами (транспортировка установки, подключение/отключение, нейтрализация отработанного раствора, отмывка и т.д.) занимает по времени 1 рабочую смену (8 часов) при численности бригады 2-3 человека, т.е. $3 \times 8 = 24$ чел.ч.
3. Сложности, возникающие при утилизации отработанного промывочного раствора.
4. Имеется вероятность повреждения пластин, патрубков теплообменников при нарушении технологии промывки.

К безусловным достоинствам метода следует отнести:

1. Высокое качество отмывки (при плотных отложениях механическая очистка эффекта не дает!).

2. Продление ресурса эксплуатации уплотнительных прокладок, которые составляют до 50% от стоимости ПТО в сборе. (По опыту известно, что ресурс прокладок зависит от рабочей температуры и составляет 6-8 разборок при сроке эксплуатации около 5 лет).

3. Возможность проведения работ в стесненных условиях (например, в котельных блочно-модульной конструкции механическая очистка ПТО практически невозможна, требуется демонтаж и вывоз пластин в приспособленное помещение).

Обобщая накопленный опыт химических промывок ПТО можно также дать следующие **рекомендации** по их проведению:

1. ПТО должны иметь исправную запорную арматуру по всем потокам, максимально приближенную к портам теплообменника. По сетевой стороне между ПТО и запорной арматурой целесообразно иметь фланцевое соединение под установку заглушки на период промывки.

2. ПТО должны быть оснащены дренажами, воздушниками и КИП (манометры, термометры) на всех патрубках.

3. Вварные штуцера теплообменников, предназначенные для подключения промывочной установки должны иметь толщину стенки не менее 6 мм, т.к. они подвергаются наибольшему износу в процессе химических промывок (были случаи отрыва штуцеров).

4. Вся арматура, трубопроводы, шланги, бак, насос и другие изделия, входящие в состав промывочной установки, должны изготавливаться из химически стойких материалов (нержавеющая сталь, пластмасса и др.).

5. Промывочный раствор не должен содержать хлор и сульфатсодержащие компоненты и иметь в своем составе ингибитор коррозии нержавеющей стали.

6. При проведении химпромывок ПТО не допускать превышения указанной в инструкции (технологической карте) температуры и концентрации промывочного раствора. После завершения химпромывки немедленно производить нейтрализацию (пассивацию) и отмывку теплообменника.

7. Работы по химической промывке ПТО должны выполняться только подготовленным персоналом по наряду-допуску.

Опыт внедрения установок очистки сетевой воды от механических примесей

Установка осветлительного фильтра ФОВ-1,0-06. В 2003 г. на котельной № 20 г. Дзержинск была смонтирована установка механического фильтрования сетевой воды на базе фильтра ФОВ-1,0-06 (фильтрующий агент – кварцевый песок). Схема установки фильтра представлена на рис. 7.

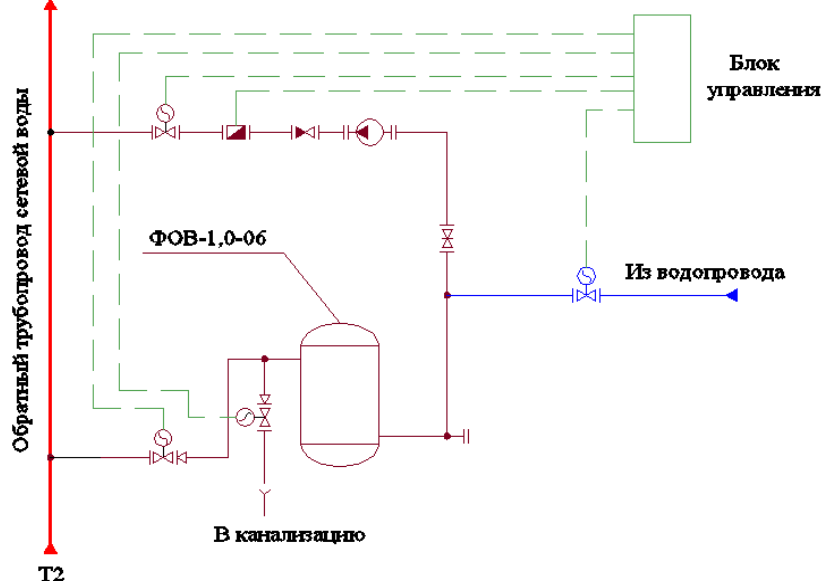


Рис. 7. Схема установки фильтра

Обрабатываемая сетевая вода поступает из обратного трубопровода сетевой воды расходом ~5% от расчетного расхода в теплосети. Указанная установка работает в автоматическом режиме с управлением от блока автоматики. Обслуживающий персонал периодически контролирует работу установки, измеряя прозрачность сетевой воды до и после фильтра. В процессе пуско-наладочных испытаний в результате работы фильтра прозрачность сетевой воды за 5 суток выросла с 10 до 35 см по шрифту. Основные недостатки: достаточно высокие габаритные размеры, значительный расход исходной воды на взрыхляющую промывку фильтра.

Установка инерционно-гравитационного грязевика ГИГ-300. Грязевик инерционно-гравитационный (ГИГ-300) установлен в 2004 г. на котельной № 26 г. Дзержинска. Грязевик смонтирован на обратном трубопроводе теплосети и рассчитан на пропуск 100% расхода сетевой воды. Минимальный

размер улавливаемых загрязнений, согласно паспорту, составляет около 30 мкм. Механические примеси оседают и накапливаются в нижней части грязевика. Удаление примесей производится периодически обслуживающим персоналом. При проведении пуско-наладочных испытаний зафиксирован рост прозрачности сетевой воды с 3,5 до 38 см в течение 10 суток. По нашим оценкам указанный грязевик за один проход улавливает около 10% всех загрязнений, содержащихся в очищаемой воде (с размером частиц свыше 30 мкм). К основным недостаткам можно отнести высокую стоимость и значительные массогабаритные характеристики грязевика.

Неплохие результаты также получены в результате применения **самопромывного фильтра тонкой очистки F76S** на котельной № 38 г. Дзержинска. Фильтр установлен на байпасе сетевых насосов и рассчитан на пропуск 3÷5% сетевой воды.

Применение акустических противонакипных устройств (АПУ)

В 2003-04 гг. на одной из котельных г. Сергач в течение 3-х месяцев проводился эксперимент по проверке эффективности действия АПУ марки «Акустик-Т» по предотвращению накипеобразования на поверхности нагрева разборного ПТО фирмы Funke. Акустические излучатели были установлены на обоих патрубках ПТО по сетевой стороне вблизи от портов.

В ходе испытаний еженедельно фиксировались температуры входа и выхода потоков и перепад давления на ПТО, оснащённом АПУ, и контрольном ПТО (не оснащённом АПУ). Оба ПТО работали в параллель при одних и тех же параметрах рабочих сред.

К сожалению, испытания показали полную неэффективность АПУ на данном объекте. Вскрытие обоих ПТО, произведенное после окончания испытаний, не выявило каких-либо отличий между теплообменниками. В обоих ПТО были обнаружены отложения карбонатной накипи толщиной около 0,6 мм (см. рис. 3).

В этой связи следует рекомендовать эксплуатационникам, прежде чем приобретать АПУ для ПТО (в первую очередь это касается разборных ПТО с резиновыми уплотнительными прокладками), предварительно брать их (без оплаты) на период опытной эксплуатации.

Методы диагностики состояния загрязненности и качества химических промывок теплообменных аппаратов

Наиболее распространенным методом определения загрязненности теплообменников является периодический контроль перепада давления на входе и выходе аппарата в процессе эксплуатации (а также до и после химических промывок). Указанный метод отличается простотой и хорошо зарекомендовал себя на практике. Однако, этот метод не всегда применим. В частности, на основании него невозможно сделать вывод о способности конкретного теплообменника выполнить свою функцию (нагреть определенное количество воды до нужной температуры), если он в момент измерения перепада давления работает в нерасчетном режиме и, в особенности, если этот теплообменник изначально подобран с запасом или недостатком поверхности нагрева.

Поясним вышесказанное на примере. Рассмотрим ПТО, работающий на отопление. Температурный график теплосети 95/70 °С. Пусть расчетные (принятые при подборе ПТО) и фактические (измеренные) параметры при одинаковом (расчетном) расходе сетевой воды составляют:

	Температура наружного воздуха, °С	Порт	Температура, °С		Перепад давления, м в. ст.	
			котловой	сетевой	котловой	сетевой
Расчет	-31	Вход	110	70	5,5	4,0
		Выход	80	95		
Факт	-5	Вход	105	47,5	5,5	18,0
		Выход	64	59,1		

Как видим, в процессе эксплуатации перепад давления по сетевой воде возрос до 18 м в. ст. Вопрос: как определить, до какой температуры наружного воздуха указанный теплообменник сможет обеспечить подогрев сетевой воды до требуемой температуры по графику, и когда следует планировать промывку ПТО?

Очевидно, что простое измерение перепада давления ответа на этот вопрос дать не может.

Некоторые авторы, наоборот предлагают излишне усложненные способы контроля загрязнения ПТО. Так, в статье [5] для контроля качества химической промывки ПТО предлагается использовать специальный стенд (совмещенный с промывочной установкой), работающий по принципу определения времени схождения температур воды в двух циркуляционных контурах, разделенных испытываемым ПТО. Стенд насыщен большим количеством дополнительного оборудования (насосы, электроподогреватель, расходомеры и пр.) требует подключения к обоим контурам ПТО (хотя промывке подвергается только один) и, по этим причинам, практически не применим для широкого использования на объектах малой теплоэнергетики. (Указанный стенд может быть рекомендован только для отработки различных технологических промывок с применением новых моющих растворов.)

Автором настоящей статьи разработан эффективный метод диагностики состояния загрязненности теплообменных аппаратов, позволяющий легко определять относительный коэффициент теплопередачи k/k_0 загрязненного теплообменника по отношению к этому же теплообменнику с абсолютно чистой поверхностью. Для анализа используются только результаты измерения 4-х температур (на входе и выходе теплообменника по обоим потокам).

Сущность метода заключается в следующем. Признанные авторитеты отечественной теплоэнергетики Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер в своих работах (см. например [1, стр. 125]) теоретически и практически обосновали существование замечательного параметра водо-водяного подогревателя «Ф», значение которого для данного подогревателя величина практически постоянная.

Параметр подогревателя Ф в общем случае определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{k \times F}{c \times \sqrt{G_{гр} \times G_{нагр}}}, \quad (2)$$

где: k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°С);
 F – площадь поверхности нагрева, м²;
 $G_{гр}$, $G_{нагр}$, – расход греющей и нагреваемой воды, кг/с.
 c – теплоемкость воды, Дж/(кг·°С).

Параметр подогревателя остается практически постоянным в широком диапазоне изменения $G_{гр}$ и $G_{нагр}$.

Так, значение параметра секционных водо-водяных подогревателей прямо пропорционально их длине: $\Phi = \Phi_y \times l$, где: Φ_y – удельный параметр, отнесенный к единице длины подогревателя, l – длина подогревателя, м.

Удельный параметр Φ_y зависит в основном от отношений площадей сечений трубок и межтрубного пространства и практически не зависит от удельной площади поверхности нагрева, приходящейся на единицу длины подогревателя, т.е. от номера или диаметра корпуса подогревателя. Для всех типоразмеров секционных водо-водяных подогревателей по ОСТ 34-588-68 и ГОСТ 27 590-88 можно практически принимать одно и то же значение удельного параметра $\Phi_y = 0,1 \text{ м}^{-1}$ при чистой поверхности нагрева, т.е. при отсутствии на ней накипи и загрязнений.

Параметр Ф пластинчатого водо-водяного подогревателя зависит от типоразмера (конструкции и профиля пластин) и не зависит от количества пластин в ПТО.

Параметр подогревателя в расчетном (основном) режиме равен:

$$\Phi_0 = \frac{k_0 \times F}{c \times \sqrt{G_{гр,0} \times G_{нагр,0}}}, \quad (3)$$

При абсолютно чистой поверхности нагрева водоподогревателя:

$$\Phi \equiv \Phi_0, \quad (4)$$

При загрязнении поверхности нагрева водоподогревателя фактическое значение параметра Ф уменьшается:

$$0 < \Phi < \Phi_0 \quad (5)$$

Очевидно также, что если сравнивать загрязненный и чистый теплообменники при одних и тех же расходах рабочих сред, получим:

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{k}{k_0}, \quad (6)$$

Выполним преобразование формулы (2), подставив в нее известные соотношения:

$$k \times F = \frac{Q}{\Delta t},$$

$$G_{гр} = \frac{Q}{c \times \Delta \tau},$$

$$G_{нагр} = \frac{Q}{c \times \Delta t},$$

Получим:

$$\hat{O} = \frac{\sqrt{\Delta t \times \Delta \tau}}{\Delta t}, \quad (7)$$

где: Δt , Δt - перепад температур на входе/выходе теплообменника для греющего и нагреваемого теплоносителя соответственно;

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_B}{\Delta t_M}} - \text{среднелогарифмический температурный напор};$$

Δt_B , Δt_M - разность температур греющего и нагреваемого теплоносителя на концах теплообменника (Δt_B - большее значение, Δt_M - меньшее значение).

Нетрудно видеть, что все параметры, входящие в формулу (7), вычисляются на основании значений 4-х температур, которые легко измерить на работающем аппарате.

Для вычисления расчетного (Φ_0) и фактического (Φ) параметра теплообменника в формулу (7) следует подставить соответствующие значения температур рабочих сред на входе и выходе теплообменника.

Затем, по формуле (6) легко определить: $(k/k_0)=(\Phi/\Phi_0)$.

Например, в вышеприведенном примере:

$$\Phi_0 = \frac{\sqrt{(95-70) \times (110-80)}}{12,3} = 2,22,$$

где:

$$\overline{\Delta t} = \frac{(110-95) - (80-70)}{\ln \left(\frac{110-95}{80-70} \right)} = 12,3^\circ \text{C}$$

Аналогично, фактический параметр теплообменника составит:

$$\Phi = 0,76$$

Получим:

$$(k/k_0)=(\Phi/\Phi_0)=0,34$$

При известном отношении (k/k_0) по графику рис.1 можно определить эквивалентную толщину накипи на поверхности нагрева теплообменника.

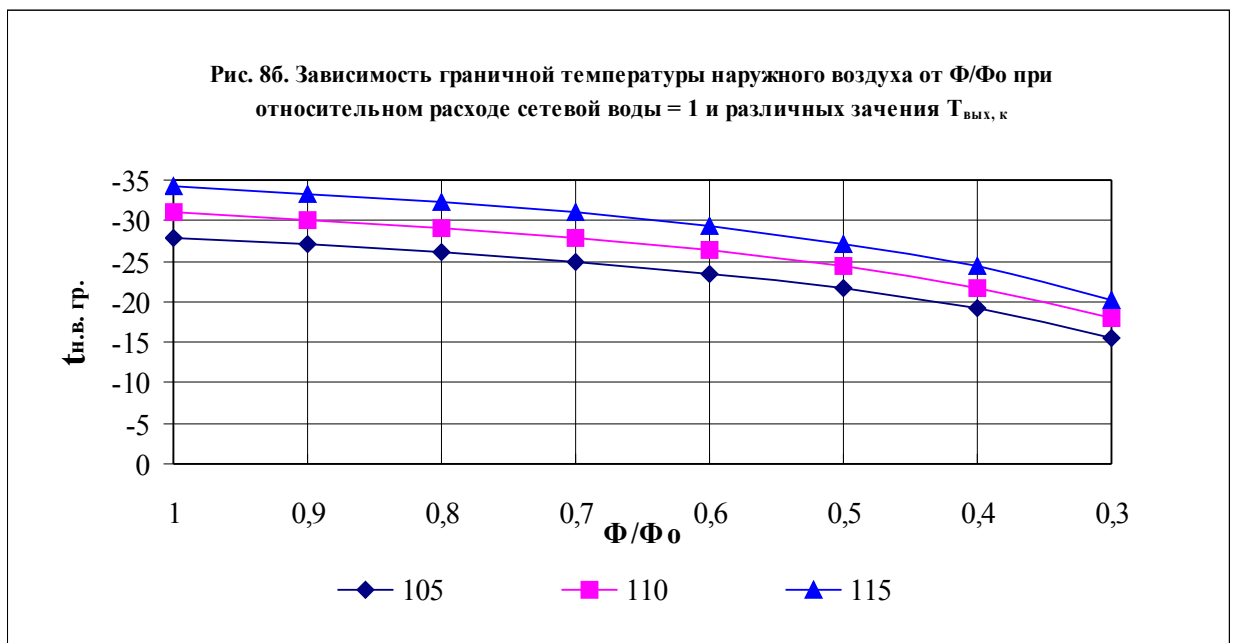
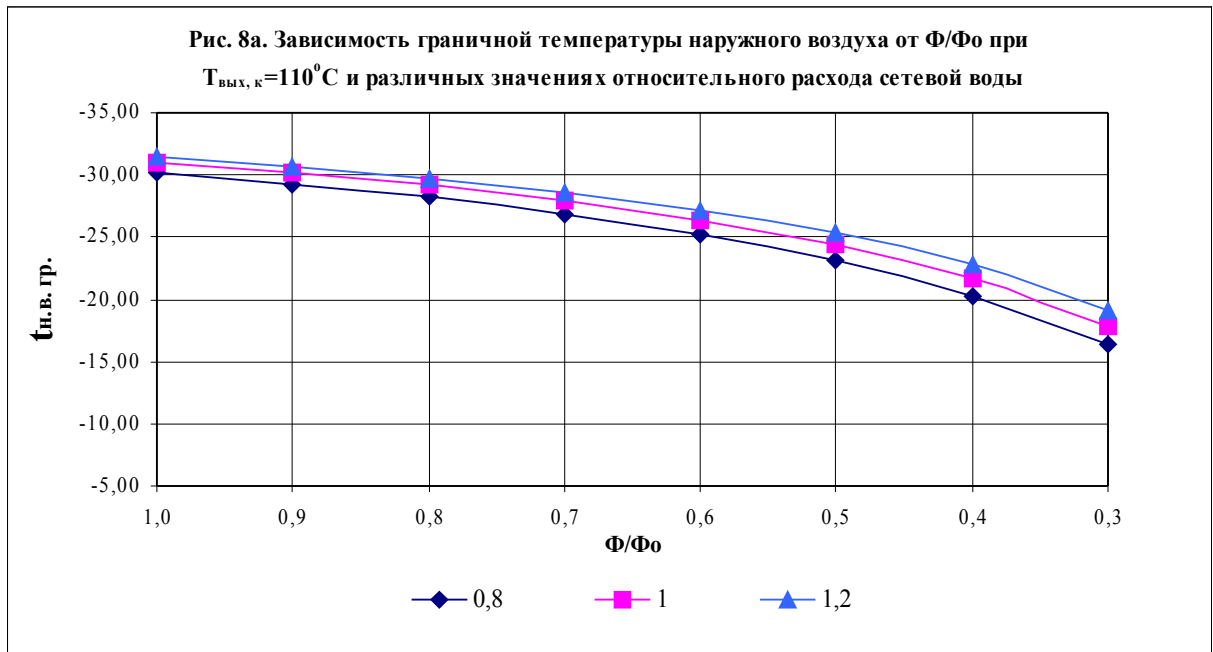
При известном фактическом значении параметра Φ загрязненного теплообменника, на основании формулы (7) и уравнений теплового баланса, описывающих характеристики оборудования и схемные решения конкретной котельной, можно получить систему нелинейных алгебраических уравнений для определения важного параметра – граничной температуры наружного воздуха, ниже которой котельная не сможет обеспечивать поддержание расчетного температурного графика в теплосети (это касается только подогревателей отопления).

Для тепловой схемы, показанной на рис. 2, система уравнений легко решается численным методом на ПЭВМ. В качестве варьируемых параметров используются:

$(G_{\text{сет}}/G_{\text{сет}, 0})$ – отношение фактического расхода сетевой воды к расчетному;

$T_{\text{вых, к}}$ – температура воды на выходе из котлов (равна температуре греющего теплоносителя на входе в подогреватель).

На графиках рис.8 (а,б) представлены полученные решения системы уравнений для котельной № 20 г. Дзержинска.



Для вышеприведенного численного примера при $(\Phi/\Phi_0)=0,34$, $T_{\text{вых}}=105^\circ\text{C}$, $(G_{\text{сет}}/G_{\text{сет, 0}}) = 1$ по графику рис. 8 получим граничную температуру $t_{\text{н.в., гр.}} = -17,0^\circ\text{C}$

В заключение следует отметить, что вышеописанная методика диагностики загрязненности ПТО в настоящее время внедрена в повседневную практику нашего предприятия.

В сотрудничестве с ООО «Реал-Информ» (г. Н.Новгород) разработан микропроцессорный прибор, сочетающий в себе шестиканальный измеритель-регистратор температуры (для контроля двух ПТО, установленных параллельно) и блок математической обработки информации. На дисплее прибора индицируются текущие значения всех измеренных температур и расчетные значения (Φ/Φ_0) и $t_{\text{н.в., гр.}}$.

Данный прибор не дорог, его стоимость в комплекте с датчиками температуры составляет около 15 тыс. руб.

Прибор может оказать неоценимую помощь персоналу теплоснабжающего предприятия, сталкивающемуся в своей деятельности с эксплуатацией пластинчатых (и других) водо-водяных теплообменников. На основании данных, полученных с его помощью, можно отслеживать динамику загрязнений ПТО, рационально планировать химические промывки (очистки) оборудования с учетом прогноза погодных условий.

Рекомендации по подбору ПТО при проектировании объектов теплоснабжения

В настоящее время все фирмы-поставщики ПТО при их продаже предлагают заказчикам услуги по подбору теплообменников, в зависимости от исходных данных и специфических требований заказчика.

При этом обе стороны заинтересованы в положительном эффекте в результате внедрения ПТО. Сами заказчики, как правило, не могут квалифицированно подобрать ПТО, поскольку методики их теплового и гидравлического расчета являются коммерческой тайной. В качестве исходных данных для выбора ПТО запрашиваются:

- тепловая мощность;
- температуры входа/выхода рабочих сред по обоим потокам;
- максимально-допустимый (располагаемый) перепад давления по обоим потокам.

В результате расчета по программе фирмы-изготовителя получают величины:

- типоразмер ПТО;
- тип и количество пластин;
- расчетный коэффициент теплопередачи;
- расчетный перепад давления по обоим потокам.

Нюанс заключается в том, что при одних и тех же заданных значениях теплового потока и температур теплоносителей могут быть подобраны ПТО разного типоразмера с существенно разным расчетным коэффициентом теплопередачи, количеством пластин и т.д. (Расчетный коэффициент теплопередачи k_0 , как правило, напрямую зависит от назначенных величин допустимого перепада давления). Очевидно, например, что теплообменник с $k_0 = 4500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ будет иметь в 1,7 раза меньшую поверхность, чем теплообменник с $k_0 = 7500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. При этом второй ПТО примерно в 1,5 раза дешевле.

Многие заказчики, не искушенные в проблемах подбора ПТО, и, к тому же, ограниченные в финансовых средствах подтверждают выбор ПТО с более высоким коэффициентом теплопередачи. При этом они обрекают себя на полный комплекс вышеописанных в предыдущих разделах проблем, связанных с потерей тепловой эффективности ПТО при загрязнении.

Как же быть в такой ситуации? Ответ на этот вопрос неоднозначен.

Во-первых, следует рекомендовать эксплуатационникам при выдаче технического задания на подбор ПТО в обязательном порядке учитывать перспективу их возможного загрязнения на основе имеющихся данных химико-аналитического контроля теплообмениваемых сред с учетом сезонных изменений.

Во-вторых, не следует устанавливать ПТО со слишком высоким значением k_0 . На наш взгляд оптимальный диапазон k_0 для ПТО составляет 4500-6000 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Здесь необходимо заметить, что проблема устранилась бы сама собой, если бы фирмы-изготовители ПТО в своих расчетных программах учитывали возможность подбора ПТО при наличии заданной степени загрязненности (толщины слоя накипи). Однако такая услуга не предоставляется. В чем причина? Не умеют считать или в водопроводных и тепловых сетях западных стран течет дистиллят?

Приходится искать обходные пути. Некоторые ошибочно полагают, что решить проблему можно путем введения запаса поверхности нагрева, т.е. рассчитать ПТО без учета загрязнения, а затем добавить некоторое количество пластин (например 20%) и дело, как говорится, «в шляпе». Однако это неправильный подход, поскольку при тех же расходах теплоносителей уменьшается скорость их течения по каналам, что ведет к снижению коэффициента теплопередачи примерно в той же пропорции. (Этот вывод следует так же из формулы (2), поскольку параметр «Ф» водоподогревателя при добавлении пластин остается постоянным). Тепловой поток же, при этом практически не изменяется ($Q = k \times F \times \Delta t$).

Правда, вышесказанное справедливо только для чистого ПТО. В случае с загрязненным ПТО возникает интересный эффект, выражающийся в том, что вследствие снижения абсолютного значения коэффициента теплопередачи теплообменника, обусловленного добавлением пластин, его относительная величина (k/k_0) при том же слое отложений становится больше. В результате рост поверхности нагрева не компенсируется снижением коэффициента теплопередачи и тепловой поток (при прочих равных условиях) несколько увеличивается. Расчеты показывают, что для теплообменника с расчетным коэффициентом теплопередачи 5000 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ и расчетным параметром $\Phi_0 = 2,22$, при толщине слоя накипи 0,2мм увеличение количества пластин на 20% обеспечивает прирост теплового потока только на 4,08%.

Таким образом, прирост поверхности нагрева ПТО (путем добавления пластин) не обеспечивает эквивалентного прироста теплового потока.

Добавление пластин экономически оправдано только в двух случаях:

- при необходимости увеличения тепловой нагрузки ПТО, т.е. расходов теплоносителей по обоим потокам;
- при необходимости уменьшения гидравлического сопротивления ПТО при неизменных расходах теплоносителей и тепловой нагрузке.

Правильная методика подбора ПТО с учетом прогнозируемого загрязнения следует из вышеприведенной теоретической модели и заключается в следующем:

1. Исходя из требований технологического процесса определяются расчетные температуры теплоносителей (при загрязненном состоянии ПТО), например:

	Греющей воды	Нагреваемой воды
--	--------------	------------------

Температура на входе	110	70
Температура на выходе	80	95

2. Определяется соответствующий этим температурам параметр теплообменника $\Phi = 2,22$.

3 Назначается желаемый коэффициент теплопередачи ПТО, например $5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. По графику рис.1 при заданной толщине слоя накипи (например $0,2\text{мм}$) определяется относительный коэффициент теплопередачи ($k/k_0=0,545$).

4. Вычисляется параметр Φ_0 при чистой поверхности нагрева: $\Phi_0=\Phi/(k/k_0)=4,07$.

5. При известных отношении расходов ($G_{\text{нагр}}/G_{\text{гр}}=(110-80)/(95-70)=1,2$) и входных температурах теплоносителей, выходные температуры найдутся из системы уравнений:

$$\begin{cases} \hat{O}_0 = \frac{\sqrt{\Delta t \times \Delta \tau}}{\Delta t} = 4,07 \\ \frac{\Delta \tau}{\Delta t} = 1,2 \end{cases}$$

В итоге получим четыре расчетные температуры для выбора ПТО при проектировании.

	Греющей воды	Нагреваемой воды
Температура на входе	110	70
Температура на выходе	75,3	99,0

Именно эти температуры должны быть включены в техническое задание, передаваемое фирме изготовителю для подбора ПТО.

Вопрос: А что же все-таки делать в ситуации, когда установленные на объекте ПТО не обеспечивают подогрев воды до нужной температуры?

В первую очередь необходимо провести анализ, в ходе которого определить:

- степень загрязнения ПТО отложениями (по описанной выше методике);
- соответствие входных температур теплоносителей и их расходов расчетным.

Для повышения теплопроизводительности ПТО можно рекомендовать следующие мероприятия:

1. Химическая промывка (или механическая очистка).
2. Повышение температуры и расхода греющего теплоносителя.
3. Замена ПТО.
4. Реконструкция ПТО с переводом на 2-х ходовую схему и увеличением количества пластин.

Последнее мероприятие было нами апробировано на котельной № 87 г. Сергач. На указанной котельной по проекту были установлены два ПТО отопления марки FPS-43-163-1E фирмы «FUNKE» тепловой мощностью $8,0 \text{ МВт}$ каждый. В процессе эксплуатации обнаружилось, что имеет место быстрое зарастание поверхностей нагрева ПТО накипными отложениями, вследствие чего котельная оказалась «заперта» - не удавалось нагреть сетевую воду выше $65-70^\circ\text{C}$ (при графике $95/70^\circ\text{C}$).

Обследование показало – при расчетном коэффициенте теплопередачи ПТО $6600 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, фактическое его значение составляло всего лишь $1736-2343 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, что соответствует относительно параметру $(\Phi/\Phi_0)= 0,26-0,36$. При разборке ПТО на поверхности нагрева были обнаружены накипные отложения толщиной $0,2-0,3 \text{ мм}$ следующего состава: 78% солей кальция, 22% оксидов железа.

Для нормализации теплоснабжения от котельной в первую очередь нами были предприняты меры по увеличению расхода (примерно на 30%) и температуры котловой воды до максимальной - от 110 до 115°C , а также корректировке реагентного водно-химического режима. Хотя все эти мероприятия дали ограниченный эффект (удалось повысить температуру сетевой воды на $5..7^\circ\text{C}$), в сочетании с регулярными химпромывками это позволило не допустить срыва теплоснабжения жилого района.

Радикально проблема была решена только в летний период 2003г., когда в сотрудничестве с известной фирмой-производителем пластинчатых теплообменников «Ридан» нами была проведена реконструкция ПТО с переводом на 2-х ходовую схему движения теплоносителей и увеличением количества пластин со 163 до 250 шт.

В результате реконструкции удалось полностью нормализовать теплоснабжение от котельной.

К отрицательным последствиям реконструкции ПТО следует отнести следующие:

- гидравлическое сопротивление ПТО увеличилось с $2,0$ до $6,8 \text{ м в.ст.}$, т.е. в $3,4$ раза;
- осложнена операция разборки ПТО из-за устройства портов и подводящих трубопроводов с двух сторон теплообменника.

Выводы

1 Поверхности нагрева ПТО подвержены загрязнению отложениями накипи, окислов железа и других механических примесей, содержащихся в сетевой воде. Интенсивность и характер загрязнения определяется качеством воды (жесткостью, концентрацией примесей) и ее температурой.

2 Загрязнение ПТО с высоким расчетным коэффициентом теплопередачи сопровождается значительным снижением тепловой эффективности аппарата.

3 Химическая промывка ПТО (в особенности, загрязненных окислами железа), является сложной технологической операцией, требует профессионального подхода к выбору реагентов и технологий промывки.

4 С целью уменьшения загрязнения ПТО продуктами коррозии железа и другими механическими примесями, содержащимися в сетевой воде, следует применять осветлительные фильтры, инерционно-гравитационные грязевики типа ГИГ и др. устройства очистки.

5 Для предотвращения накипеобразования на поверхностях нагрева ПТО, подогревающих сетевую воду с высокой жесткостью, и снижения скорости коррозии тепловых сетей рекомендуется применять реагентный (комплексонный) водно-химический режим тепловых сетей.

6 Предложена эффективная методика диагностики загрязненности теплообменных аппаратов, разработано приборное и программное обеспечение для создания системы мониторинга степени загрязнения с оценкой остаточного ресурса работы до промывки (очистки).

7 При проектировании и выборе ПТО в обязательном порядке необходимо учитывать возможное загрязнение поверхности нагрева. Предложена методика подбора ПТО с учетом загрязнения.

Список литературы:

- 1 Соколов Е.Я. «Теплофикация и тепловые сети», Издание 7-е, 2001г, М., Издательство МЭИ.
- 2 Михеев М.А., Михеева И.М. «Основы теплопередачи», 1973г, М., «Энергия».
- 3 Барон В.Г. «Легенды и мифы современной теплотехники или пластинчатые и кожухотрубные теплообменные аппараты» // «Новости теплоснабжения», 2004г, №8, с.38-42.
- 4 Дрейцер Г. А. «О некоторых проблемах создания высокоэффективных трубчатых теплообменных аппаратов» // «Новости теплоснабжения», 2004г, №5, с.37-43.
- 5 Тарадай А.М., Коваленко Л.М., Гурин Е.П. «Контроль качества химической промывки от загрязнения теплообменных аппаратов» // «Новости теплоснабжения»// Интернет-сайт www.rosteplo.ru.
- 6 Слепченко В.С., Быстров В.Д., Зак М.Л., Палей Е.Л. «Отопительные котельные малой мощности» // «Новости теплоснабжения», 2004г, №9, с.24-33