

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА КОНДЕНСАЦИОННЫХ УСТАНОВОК ПАРОВЫХ ТУРБИН

Продолжаем публикацию статьи об основных аспектах применения технологии модификации поверхности теплообмена конденсационных установок паровых турбин с использованием поверхностно-активных веществ. Совместные исследования в этой области осуществляли ученые России и Беларуси в рамках Межгосударственной программы инновационного сотрудничества государств – участников СНГ на период до 2020 года. Опыт использования технологии подтвердил ее экономическую эффективность. В настоящее время она проходит адаптацию на ряде электростанций России и планируется к внедрению на энергетических объектах Беларуси.

Часть 2.

В.А. СЕДНИН,
д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой
«Промышленная теплоэнергетика
и теплотехника» БНТУ

А.В. СЕДНИН,
к.т.н., доцент, заведующий
центром автоматизированных
систем управления в теплоэнергетике
и промышленности
филиала НИПИ БНТУ

А.В. ВОЛКОВ,
д.т.н., профессор ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский
университет «МЭИ»

А.В. РЫЖЕНКОВ,
д.т.н., директор НЦ «Износостойкость»
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»

М.В. ЛУКИН,
к.т.н., доцент, старший научный
сотрудник НЦ «Износостойкость»
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»

Методы интенсификации теплообмена

На сегодняшний день в технической литературе имеется огромная информационная база по интенсификации теплообмена [1–7]. Согласно теории гидродинамического пограничного слоя, теплоотдача от жидкости или газа к твердой стенке или наоборот происходит в тонком пристенном слое за счет теплопроводности. Коэффициент теплоотдачи является сложной

функцией, зависящей от физических свойств рабочей среды, скорости ее движения, геометрических размеров канала и формы теплопередающей стенки. Обычно физические свойства рабочих сред и температурный режим известны из исходных данных для расчета теплоотдачи. Таким образом, влиять на интенсивность теплоотдачи можно изменением геометрических размеров каналов, скорости движения рабочей среды и формы поверхности теплообмена.

Наиболее известные методы интенсификации теплообмена можно разделить на три группы (см. таблицу 1): пассивные (не требуют внешнего подвода энергии для интенсификации), активные (требуют внешнего подвода энергии) и сложные (комбинированные) методы.

Активные методы могут основываться на вибрации поверхности, пульсации потока, создании электростатического поля, отсосе пограничного слоя, механической закрутке потока или его турбулизации,

Таблица 1. Классификация способов интенсификации теплообмена [8]

Группа методов интенсификации	Метод интенсификации
Активные	<ul style="list-style-type: none"> • механические • вибрационные (вибрация поверхности) • пульсация потока • электростатические поля • инъекция • отсос пограничного слоя • струйные аппараты
Пассивные	<ul style="list-style-type: none"> • обработанные поверхности • шероховатые поверхности • развитые поверхности • перемешивающие устройства • устройства, закручивающие поток • змеевики • устройства поверхностного натяжения • добавки для жидкостей • добавки для газов
Комбинированные	Комбинация двух или более пассивных и/или активных методов

разрушении пограничного слоя с использованием дополнительных потоков газа или жидкости.

К пассивным относятся методы, основанные на изменении фактуры (шероховатости) или формы поверхности теплообмена, увеличении турбулентности потока (перемешивании), закручивании потока, оребрению или гидрофобизации поверхности.

Сложные методы включают в себя несколько методов одновременно (например, воздействие механической вибрации на гидрофобные трубные поверхности).

Наиболее эффективными и перспективными методами интенсификации теплообменных процессов в конденсаторе являются различные способы перевода пленочной конденсации пара в капельную путем гидрофобизации наружных поверхностей трубной системы.

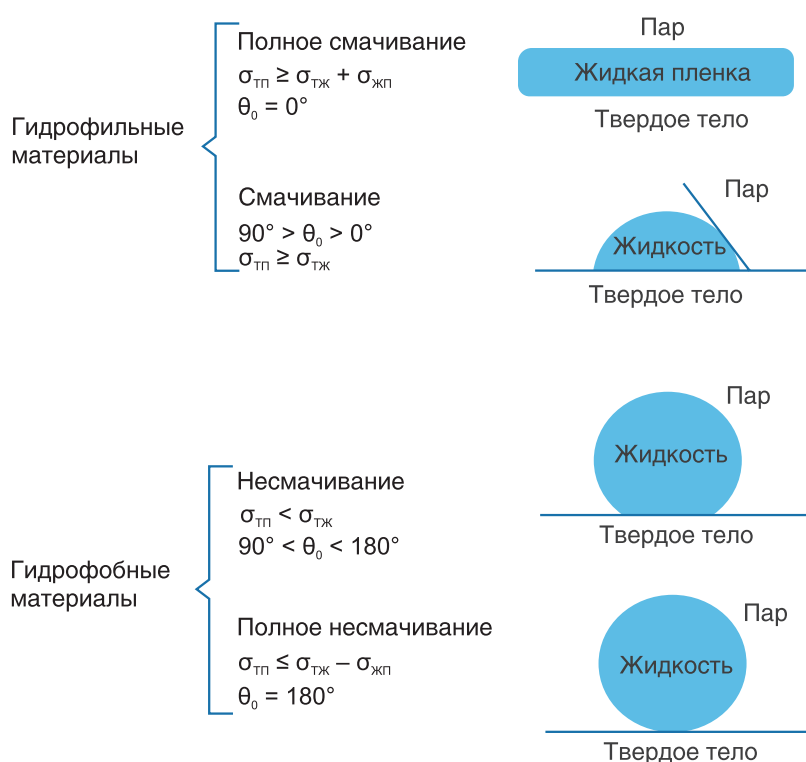


Рис. 1. Типы смачивания

Гидрофобизация поверхностей

Более 200 лет назад Т. Юнг в классической работе «An Essay on the Cohesion of Fluids» [8] показал, что равновесный макроскопический угол смачивания (θ_0) – термодинамическая характеристика, которая может быть выражена через другие термодинамические параметры системы – поверхностные энергии границ раздела «твердое тело – пар» ($\sigma_{тп}$), «твердое тело – жидкость» ($\sigma_{тж}$) и «жидкость – пар» ($\sigma_{жп}$):

$$\cos\theta_0 = (\sigma_{тп} - \sigma_{тж})/\sigma_{жп}$$

Из этого соотношения, получившего в дальнейшем название «уравнение Юнга», следует, что для изменения угла смачивания достаточно изменить свойства приповерхностных слоев толщиной в несколько нанометров. Именно эти слои и определяют значения поверхностной энергии.

По величине угла смачивания принято выделять несколько типов смачивания поверхностей (рис. 1).

Несмачиваемость металлической поверхности и организация на ней капельной конденсации могут быть получены либо нанесением на поверхность трубок специальных гидрофобизаторов (органических и неорганических соединений, ультратонкого слоя благородных металлов или тонкой пленки полимеров), либо периодической или непрерывной инъекцией стимулятора капельной конденсации в рабочее тело цикла, обработкой поверхности трубок дисульфидами или иными методами.

Анализ общедоступных источников научно-технической и конъюнктурной литературы, результатов лабораторных и промышленных испытаний [6, 7, 9] позволил выделить в качестве перспективных гидрофобизаторов поверхностно-активные вещества (ПАВ) на основе алифатических пленкообразующих аминов с углеводородным радикалом C16–C20, в частности октадециламин (ОДА).

Использование ПАВ в качестве гидрофобизаторов

Поверхностно-активное вещество может адсорбироваться на границе раздела фаз, если оно, присутствуя в поверхностном слое, будет уравнивать разность полярностей этих фаз. При этом полярная группа всегда направлена в сторону более полярной фазы. Если фазами являются вода и металл, то углеводородные радикалы образуют на поверхности металла водоотталкивающий частокол Ленгмюра. При этом силы когезии (межмолекулярного взаимодействия) воды превышают силы ее адгезии к углеводородным радикалам, и вода собирается в каплю. Таким образом, сконденсированная в виде сплошной пленки паровая фаза на наружных поверхностях трубок конденсатора переходит в капельную форму.

Интенсивность эвакуации жидкой фазы с поверхности теплообмена напрямую зависит от степени ее гидрофобизации или от величины значений краевого угла смачивания: чем они выше, тем быстрее происходит скатывание капель с поверхности трубок, соответственно, ускоряется процесс теплообмена и увеличивается коэффициент теплопередачи конденсатора.

Экспериментальные исследования влияния краевого угла смачивания медных трубных поверхностей на коэффициент теплопередачи при использовании ПАВ были проведены на экспериментальном стенде, моделирующем процессы конденсации пара в конденсаторах находящихся в работе паровых турбин [6]. Экспериментально подтверждено, что с увеличением краевого угла смачивания поверхности теплообмена (θ) с 79° до 149° значение коэффициента теплопередачи на увеличивается 23 %. Фотография модифицированной поверхности трубного пучка приведена на рисунке 2.

Технология гидрофобизации теплообменных поверхностей на основе ПАВ успешно апробирована в 2013 году на ТЭЦ-23 ПАО «Мосэнерго» [7] и в 2017 году на ТЭЦ-2 ООО «ЛУКОЙЛ-

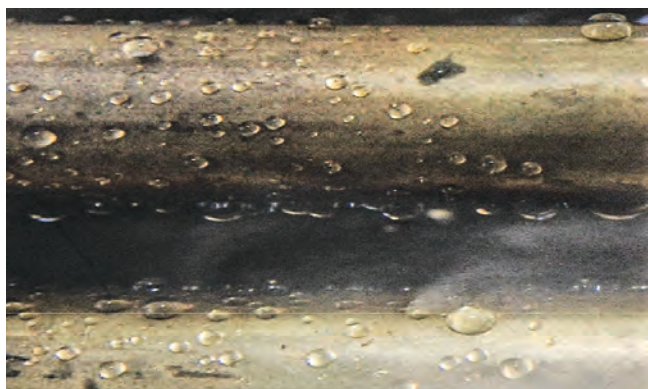


Рис. 2. Конденсация пара на модифицированной поверхности трубок конденсатора с использованием ПАВ [7]

Астраханьэнерго». После проведения модификации водной эмульсией ОДА трубной системы двухкорпусного конденсатора КГ 2-6200-2 турбины Т-110/120-130/5 ТЭЦ-23 на поверхности трубок по паровой стороне была сформирована пленка ОДА со средним углом смачивания $\theta = 11^\circ$ (до обработки $\theta = 79^\circ$), что свидетельствовало о гарантированной гидрофобизации поверхности.

По итогам анализа результатов реализации технологии установлено, что проведение достаточно простых технологических операций, заключающихся в периодической обработке конденсатора водной эмульсией ОДА, позволяет:

- интенсифицировать процесс теплообмена в конденсаторе на 13 %;
- увеличить расход пара в турбину вследствие снижения давления в конденсаторе и, соответственно, увеличить мощность, вырабатываемую энергоблоком;
- увеличить КПД выработки электроэнергии на 1,8 %.

Формирование молекулярных слоев на теплообменных поверхностях конденсатора может быть осуществлено в период останова оборудования или при эксплуатации путем инъекции ПАВ в пар. Однако в случае гидрофобизации поверхности водной эмульсией сорбция ПАВ на поверхности на два порядка выше сорбции из пара.

Уникальной особенностью ПАВ из класса пленкообразующих аминов является также способность многократно снижать скорость накопления отложений на теплообменных поверхностях энергетического оборудования вне зависимости от химического состава теплоносителя, что подтверждается как результатами экспериментальных исследований [10, 11], так и многократной апробацией данной технологии [12–14]. Например, при параметрах, характерных для реальных условий эксплуатации систем технического водоснабжения ТЭС, скорость накопления отложений на внутренних поверхностях трубок конденсатора паровых турбин снижается в 6–8 раз.

В условиях применения ПАВ из класса пленкообразующих аминов для конденсационной турбины дополнительная выработка электроэнергии составит:

Таблица 2. Анализ режимов работы теплофикационного энергоблока на примере Минской ТЭЦ-4 за 2017 год

Месяц	Наработка, ч	Вакуум в конденсаторе, кПа	Режим работы энергоблока			Температура охлаждающей воды на входе $t_{в, \text{°C}}$	Температура охлаждающей воды на выходе $t_{г, \text{°C}}$	Расход пара в конденсатор, т/ч	Расход охлаждающей воды, т/ч	Активная мощность, МВт
			Конденсационный режим	Одноступенчатый подогрев сетевой воды	Двухступенчатый подогрев сетевой воды					
Январь	744	4,0			■	15	18	79	15 362	186
Февраль	672	4,1			■	16	20	126	18 251	241
Март	744	4,2		■	■	17	19	50	14 395	231
Апрель	720	4,3			■	16	19,5	124	20 507	240
Май	112	4,1			■	14	18	129	18 697	215
Июнь	0									
Июль	0									
Август	0									
Сентябрь	0									
Октябрь	704	3,6		■	■	14	16,7	86	18 597	201
Ноябрь	720	3,5			■	13	16	101	19 517	213
Декабрь	682	3,4			■	12	15,7	132	20 782	214
Σ за год	5098									
С момента пуска	185 832									

■ – отметка указывает на использование соответствующего режима

$$\Delta E = \int_{\tau} \Delta N d\tau = \sum_{i=1}^I \Delta N_i \delta\tau_i \approx N_{\text{ном}} \tau_{\text{ном}},$$

где $\delta\tau_i$ – промежутки времени работы турбины с мощностью ΔN_i , с; $N_{\text{ном}}$, $\tau_{\text{ном}}$ – соответственно номинальная мощность турбины, Вт, и приведенное время работы турбины на номинальной мощности в течение года, с.

Для теплофикационной турбины следует выделять теплофикационный и конденсационный потоки пара. Дополнительная выработка электроэнергии происходит только на конденсационном потоке, превышающем по своей величине вентиляционный пропуск пара в турбину:

$$\Delta E = \int_{\tau} \Delta N_{\text{конд}} d\tau_{\text{конд}} = \sum_{i=1}^I \Delta N_{\text{конд}i} \delta\tau_{\text{конд}i} \approx \Delta N_{\text{конд}} \tau_{\text{конд}},$$

где $\delta\tau_i$ – промежутки времени, когда конденсационный поток превышает вентиляционный пропуск пара в конденсатор, с; $\Delta N_{\text{конд}i}$ – электрическая мощность турбины на конденсационном потоке, соответствующая промежутку времени $\delta\tau_{\text{конд}i}$, Вт; $\Delta N_{\text{конд}}$, $\tau_{\text{конд}}$ – соответственно номинальная электрическая мощность турбины в конденсационном режиме, Вт, и приведенное время работы турбины на номинальной мощности в конденсационном режиме в течение года, с.

Нами был произведен расчет на основе режимных данных одного из энергоблоков Минской ТЭЦ-4 за 2017 год (см. таблицу 2) с номинальным расходом пара в конденсационном режиме $G_{\text{оп}} = 776 \text{ т/ч}$ (215,6 кг/с).

Изменение мощности составило:

$$\Delta N = G_{\text{оп}} (H'_0 - H_0) = 0,496 \text{ МВт.}$$

Работа энергоблока в конденсационном режиме в течение 4 месяцев (интегральная величина периода по данным АСУ ТП энергоблока за 2017 год) обеспечит экономию топлива в объеме

$$0,496 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 0,334/3 = 483,7 \text{ т у.т./год.}$$

При стоимости природного газа \$ 220 за 1 т у.т. экономический эффект достигнет соответственно \$ 106 тыс. в год.

Выводы

1. Ввиду того что конденсационные устройства являются важным элементом паротурбинных установок и в значительной степени определяют надежность и экономичность функционирования ТЭС, актуальным является совершенствование их работы в части установления и поддержания во время работы турбины оптимального разрежения (вакуума) за ее выходным патрубком.

2. Показано, что повышение эффективности паротурбинных блоков за счет модификации поверхностей теплообмена достигается путем гидрофобизации с использованием ПАВ для перевода режима пленочной конденсации в режим капельной со стороны конденсирующегося пара и для минимизации накопления отложений со стороны охлаждающей воды. Применение технологии приводит к увеличению коэффициента теплопередачи на 15–20 %, снижению давления

в конденсаторе на 0,5–2,0 кПа и в результате – к повышению эффективности работы энергоблока.

3. Использование ПАВ из класса алифатических аминов для модификации внутренних и внешних трубных поверхностей конденсаторов паровых турбин позволит в комплексе решить проблему «недовыработки» электрической энергии за счет поддержания оптимального температурного напора конденсатора путем применения капельного режима конденсации, обеспечивающего существенное снижение скорости накопления отложений в трубных поверхностях.

4. Расчеты для конденсатора типа К2-14000-I, выполненные на основе данных реальных режимов работы одного из энергоблоков Минской ТЭЦ-4, показывают высокую эффективность данной технологии и целесообразность ее применения на электростанциях Белорусской энергосистемы.

Список литературы

1. Гавриш, А.С. Особенности механизма капельной конденсации и перспективы применения нанотехнологий / А.С. Гавриш // *Тепловые процессы в технике*. – 2010. – № 10. – С. 461–465.
2. Исаченко, В.П. Теплообмен при конденсации / В.П. Исаченко // *М.: Энергия*, 1977. – 240 с.
3. Коваленко, Л.М. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи / Л.М. Коваленко, А.Ф. Глушков // *М.: Энергоатомиздат*. – 1986. – 240 с.
4. Кузма-Кичта, Ю.А. Методы интенсификации теплообмена при конденсации / Ю.А. Кузма-Кичта [и др.] // *Тепловые процессы в технике*. – 2013. – № 5. – С. 217–223.
5. Попов, И.А. Промышленное применение интенсификации теплообмена – современное состояние проблемы (обзор) / И.А. Попов [и др.] // *Теплоэнергетика*. – 2012. – № 1. – С. 3–14.
6. Рыженков, В.А. Интенсификация теплообменных процессов в конденсаторах паровых турбин на основе модификации внутренних и внешних поверхностей трубных пучков с использованием ПАВ / В.А. Рыженков [и др.] // *Естественные и технические науки*. – 2012. – № 3. – С. 327–336.
7. Куршаков, А.В. Интенсификация теплообменных процессов в конденсаторах паровых турбин с использованием поверхностно-активных веществ / А.В. Куршаков [и др.] // *Теплоэнергетика*. – 2014. – № 11. – С. 16–20.
8. Young, Thomas. *An Essay on the Cohesion of Fluids* / T. Young // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. – Vol. 95 (1805). – P. 65–87.
9. Дейч, М.Е. Двухфазные течения в элементах турбин и теплоэнергетического оборудования / М.Е. Дейч, Г.А. Филлипов. – *М.: Энергоатомиздат*, 1987. – 327 с.
10. Рыженков, В.А. О состоянии проблемы образования термобарьерных отложений и возможности использования минерализованной воды в системах теплоснабжения в качестве теплоносителя / В.А. Рыженков, М.В. Лукин // *Вестн. МЭИ*. – 2008. – № 1. – С. 21–28.
11. Лукин, М.В. Модификация теплообменных поверхностей с использованием поверхностно-активных веществ / М.В. Лукин // *Главный энергетик*. – 2011. – № 9. – С. 50–56.
12. Рыженков, А.В. Результаты реализации ПАВ-технологии в системе теплоснабжения г. Москвы / А.В. Рыженков [и др.] // *Энергосбережение и водоподготовка*. – 2013. – № 6. – С. 9–14.
13. Рыженков, А.В. Результаты работ по повышению эффективности систем централизованного теплоснабжения на основе ПАВ-технологии за 2003–2013 гг. / А.В. Рыженков [и др.] // *Надежность и безопасность энергетики*. – 2014. – № 2. – С. 18–22.
14. Lukin, M.V. *The Results of the Implementation of SAS Technology for the Renovation and Life Extension of District Heating Systems* / M.V. Lukin // *Fifth international conference on energy and sustainability «Energy and Sustainability 2014»*, WIT Press. – P. 125–131.