

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.187.11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ОТ ОТЛОЖЕНИЙ В ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ТРУБАХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

А.Ю. ФЕДОРОВА, Е.Н. БУШУЕВ

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: abdvlenka@mail.ru; admin@xste.ispu.ru

Состояние вопроса. Для обеспечения надежной работы парового котла периодически проводят эксплуатационные очистки внутренних поверхностей пароводяного тракта. Для таких очисток могут быть использованы традиционные и новые моющие кислотные реагенты. Для разработки программы эффективной химической очистки требуется прогнозировать ее необходимую длительность с учетом свойств используемого моющего реагента и загрязненности поверхности металла. Недостаточная продолжительность этой операции приводит к остаточной загрязненности, а избыточная – к растворению металла. Традиционно необходимое время химической очистки оценивают по результатам лабораторных опытов. Целью исследования является получение аналитических зависимостей и определение характеристик, описывающих кинетику кислотной стадии химической очистки паровых котлов.

Материалы и методы. Лабораторные исследования кислотной стадии химической очистки образцов испарительных труб паровых котлов высокого давления выполнены с использованием метода химического травления. При этом определены скорости и полнота удаления бугорчатых и равномерных отложений кислотными реагентами. Для получения кинетического уравнения использован метод математического моделирования. Условные константы скоростей очистки для этого уравнения найдены методами статистической обработки результатов лабораторного исследования.

Результаты. Предложено описание скорости удаления отложений с внутренней поверхности испарительных труб в виде кинетического уравнения первого порядка в зависимости от их удельной загрязненности и кислотности моющего раствора реагента. Уравнение позволяет рассчитать необходимую продолжительность химической очистки с обеспечением заданной остаточной удельной загрязненности поверхности металла. По результатам лабораторных исследований определены условные константы скоростей очистки при использовании проверенных моющих реагентов и видов отложений.

Выводы. Адекватность полученных результатов обеспечивается их согласованностью с практическими данными. Результаты исследования могут быть использованы при выборе технологии кислотных стадий химических очисток от бугорчатых и равномерных отложений и обоснования их продолжительности с обеспечением нормативной остаточной удельной загрязненности поверхности испарительных труб паровых барабанных котлов.

Ключевые слова: паровой котел, испарительные трубы, внутритрубные отложения, химическая очистка, моющий кислотный реагент, кинетика химической очистки

DETERMINING OF KINETIC CHARACTERISTICS OF CHEMICAL CLEANING FROM SCALE DEPOSITS IN STEAM BOILER GENERATING TUBES

A.Yu. FEDOROVA, E.N. BUSHUEV

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: abdvlenka@mail.ru; admin@xxte.ispu.ru

Abstract

Background. Reliable operation of steam boilers is maintained by periodic in-service cleanings of the internal surfaces of the steam-water path. Such cleanings can be made with traditional and new acid cleaning agents. The necessary condition for developing an effective chemical cleaning program is predicting its required duration taking into account the properties of the detergent used and the contamination of the metal surface. Insufficient duration of this operation leads to increased residual contamination, while excessive duration – to metal dissolution. Traditionally, the required time for chemical cleaning is evaluated according to the results of laboratory experiments. The aim of this study is to obtain analytical dependencies and characteristics describing the kinetics of the acid stage of steam boiler chemical cleaning.

Materials and methods. The laboratory studies of the acid stage of chemical cleaning of samples of high-pressure steam boiler generating tubes were performed by the chemical etching method. The rates and completeness of the removal of lumpy and uniform deposits by acid reagents were also determined. The method of mathematical modeling was used to obtain the kinetic equation. The conditional purification rate constants for this equation were found by the methods of statistical processing of laboratory results.

Results. A description of the scale removal rate from the inner surface of the steam generating tubes is proposed as a first-order kinetic equation depending on their specific contamination and reagent washing solution acidity. The equation allows calculating the required duration of chemical cleaning for providing a given value of specific residual contamination of the metal surface. According to the results of the laboratory studies, the conditional rate constants of purification were determined using proven detergent reagents and types of scale.

Conclusions. The adequacy of the obtained results is ensured by their consistency with real-life data. The results of the study can be used to select the technology of acid stages of chemical cleaning of lumpy and uniform deposits and justify their duration for providing standard values of specific residual contamination of the surface of steam generating tubes of drum boilers.

Key words: steam boiler, steam generating tubes, intratubal scale deposits, chemical cleaning, washing acid reagent, chemical cleaning kinetics

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.4.005-011

Введение. Неизбежность внутренней коррозии пароводяного тракта ТЭС и образования внутритрубных отложений обуславливает потребность в эксплуатационных очистках внутренних поверхностей пароводяного тракта котлов. В ряде случаев приемлемое рабочее состояние этих поверхностей поддерживается периодическими очистками в режимах пуска и останова, «на ходу». И все-таки жизненный цикл котла начинается с предпусковой химической очистки (ХО) и сопровождается его эксплуатационными ХО при выводе из оперативного состояния «работа» [1–5].

В настоящее время большое количество ТЭС не имеет готовых к использованию установок ХО, обеспечивающих циркуляционную очистку котлов. Проводятся очистки как при «вялой» циркуляции, так и без циркуляции моющих растворов. В процессе любой очистки образуется шлам, являющийся продуктом разрыхления отложений и оседающий в «ловушках» шла-

ма: коллекторах и барабане котла. Во время ХО не достигается полного растворения этого шлама. Его удаление из котла на химических стадиях очистки при «вялой» циркуляции и без нее либо сопряжено с потерями реагента (при сбросе зашламленного раствора на установку обезвреживания), либо требует монтажа дополнительных трубопроводов в промежуточный бак очистки и устройства в нем отсека для накопления шлама. Надеяться на полное удаление шлама из котла через его «нижние точки» невозможно из-за малых диаметров присоединенных к ним дренажных трубопроводов и относительно большой длины коллекторов. Независимо от наличия или отсутствия циркуляции моющего раствора, завершающим этапом ХО является удаление отложений шлама, образовавшегося при очистке котла и осевшего в «ловушках» шлама, коллекторах и барабане котла.

Отбор представительной пробы для анализа моющего раствора на содержание в нем соединений железа затруднен их присутствием как в растворенном состоянии, так и в виде взвешенных веществ. По этой причине следует признать большую надежность обнаружения окончания кислотной стадии ХО по стабилизации параметра моющего раствора (по кислотности, pH), а не концентрации соединений железа в нем.

Значимость ХО в комплексе мероприятий по ведению водно-химического режима обуславливает целесообразность пробных лабораторных ХО образцов труб.

Основная цель пробных лабораторных ХО – получение опытных данных о влиянии состава моющего раствора, наличия или отсутствия его циркуляции, температуры и длительности на техническую эффективность очисток моющими реагентами по критериям скорости и полноты удаления бугорчатых и равномерных отложений, характеризующихся остаточной удельной загрязненностью поверхности образца экранной трубы, и по доле образовавшегося шлама. Указанные опытные данные используются при разработке программ ХО [3].

Материалы и методы лабораторных исследований. Без предварительной химической обработки трубных образцов с эксплуатационными отложениями, содержащими медь и ее оксиды, исследовалась эффективность кислотных стадий ХО с применением растворов соляной кислоты с добавкой уротропина и тиомочевина, реагентов Антиржавин, Дескам, Auge Pro As, часто рассматриваемых в качестве основного моющего средства для эксплуатационных ХО котлов. Тиомочевина использована для предотвращения осаждения из моющего раствора металлической меди на очищаемых образцах. Композиционный реагент Auge Pro As 60 производится для очистки труб поверхностей нагрева котлов от железисто-оксидных отложений с увеличенной долей в них соединений меди [6]. Реагенты Антиржавин и Дескам эффективны при очистке труб поверхностей нагрева котлов от железисто-оксидных отложений.

Для лабораторного исследования использовались образцы труб чистого и солевого отсеков котла высокого давле-

ния, покрытых как равномерными, так и бугорчатыми отложениями.

Внутритрубные отложения на огневой стороне экранных труб являлись бугорчатыми (рис. 1). Высота бугорков над поверхностью отложений достигала 5 мм, удельная локальная (очаговая) загрязненность составляла от 1200 до 8000 г/м². Эти отложения являются отвердевшими отложениями шлама, вызвавшими подшламовую коррозию.



Рис. 1. Бугорчатые отложения на огневой стороне экранных труб солевого отсека

Равномерные двухслойные отложения с бугорками высотой над поверхностью отложений до 1 мм характерны для тыльной внутренней стороны экранных труб солевого отсека, ее удельная загрязненность составляла от 380 до 600 г/м² (рис. 2). Удельная загрязненность равномерными отложениями огневой стороны этих труб – в пределах от 800 до 1300 г/м².



Рис. 2. Равномерные отложения на тыльной стороне экранных труб солевого отсека

Перед лабораторным исследованием образцы труб очищались от отложений на газовой стороне, затем вместе с дисковыми индикаторами коррозии, изготовленными из стали 20, обезжиривались, помещались в эксикатор на сутки; взвешивались и фотографировались в исходном

состоянии; помещались в химические стаканы для проведения очистки.

Рабочие моющие растворы для очистки от отложений приготовлены путем разбавления товарных форм реагентов бидистиллятом. Очистка проводилась в нагретых и ненагретых растворах методом травления в несколько этапов.

Очистка образцов от отложений осуществлялась при температурах моющих растворов 25 и 55 °С. По истечении заданного времени первого этапа кислотной очистки образцы труб и индикаторы извлекались из химических стаканов, отмывались от моющего раствора при погружениях в бидистиллят, сушились в сушильном шкафу при температуре от 105 до 110 °С, охлаждались в эксикаторе с прокаленным хлористым кальцием, снова взвешивались и фотографировались.

Все последующие операции проводились аналогичным образом до окончания программы лабораторных испытаний [3].

Для получения сравнимых результатов пробных лабораторных очисток растворами разных реагентов осуществлялись следующие действия:

- подбирались одинаковые визуально образцы труб одной поверхности нагрева;

- готовились моющие растворы с заданными производителями объемными долями реагентов;

- поэтапно контролировалась кислотность растворов и масса образца. По значениям этой массы определялись текущие значения удельной загрязненности образца. По балансу кислоты и отложений в предположении расхода кислоты на растворение оксидов определялся вклад в очистку растворения и разрыхления отложений;

- в предположении первого порядка процесса очистки относительно произведения удельной загрязненности и кислотности моющего раствора рассчитывались поэтапные значения условной константы скорости (УКС) очистки. Для процессов очистки в целом определялись среднеарифметические значения этапных УКС. С использованием этих констант рассчитывались этапные значения кислотности растворов и в результате сравнения их с экспериментальными значениями были получены значения критерия Фишера, указывающие на адекватность математического описания процесса очистки как реак-

ции второго порядка (первого по удельной загрязненности и первого по кислотности).

Результаты лабораторных исследований. В таблице приведены условия и результаты лабораторной проверки технической эффективности моющих реагентов по значениям УКС очисток и проверки методики расчета их длительности.

Предлагается уравнение зависимости скорости очистки от удельной загрязненности труб и кислотности моющего раствора в отношении к каждому из этих определяющих факторов, которое описывается кинетическим уравнением первого порядка:

$$\frac{dK}{d\tau} = -k[g_0 - \alpha(K_0 - K)]K, \quad (1)$$

где τ – длительность очистки, с; K_0 , K – начальная и текущая кислотности моющего раствора, моль/дм³, соответственно; k – условная константа скорости очистки, дм³·моль⁻¹·с⁻¹; g_0 – начальная удельная загрязненность поверхности отложениями, г/м²; α – стехиометрический коэффициент реакции растворения оксидов, учитывающий, в частности, соотношение объема контура ХО и площади его очищаемой внутренней поверхности.

Присутствие удельной загрязненности в формуле (1) объясняется тем, что ХО является гетерогенным процессом, в котором важное значение имеет площадь поверхности химической реакции. При наличии в отложениях сообщающихся пор площадь реакции пропорциональна удельной загрязненности образца трубы.

УКС кислотной стадии ХО определена по следующей формуле:

$$k = -\frac{K_{\text{кон}} - K_{\text{нач}}}{\tau[g_{\text{нач}} - \alpha(K_{\text{нач}} - K_{\text{кон}})]K_{\text{кон}}}. \quad (2)$$

Расчетная длительность кислотной стадии ХО определена путем интегрирования по формуле

$$\tau = \frac{1}{b} \ln \left| \frac{1 + \frac{b}{aK_0}}{1 + \frac{b}{aK}} \right|,$$

где $a = \alpha kz$, $b = kg_0 - \alpha kzK_0$; z – коэффициент эффективности реагента.

Фактические и расчетные параметры ХО

Наименование моющего раствора (кратность разбавления)	Тип отложений	Наличие циркуляции, температура раствора, °С	Начальная (конечная) кислотность, моль/дм ³	Начальная (конечная) удельная загрязненность, г/м ²	Условная константа скорости очистки, дм ³ ·моль ⁻¹ ·с ⁻¹	Фактическая длительность всей очистки (τ), с (ч)	Расчетная длительность очистки с учетом среднего <i>r</i> , с (ч)	Усредненный коэффициент эффективности реагента
Auge Pro Ac 60H (1:6)	равномерные	нет, 25	0,795 (0,36)	1 311,967 (90,002)	$2,825 \cdot 10^{-8}$	163 116 (29)	137 369 (38)	1,042
Auge Pro Ac 60 (1:6)	равномерные	нет, 25	0,76 (0,325)	1 080,214 (75,670)	$2,501 \cdot 10^{-8}$	104 616 (29)	101 241 (28)	1,050
Антиржавин (1:15)	равномерные	нет, 25	0,328 (0,073)	1 015,818 (31,223)	$5,900 \cdot 10^{-8}$	104 616 (29)	129 017 (36)	2,499
Auge Pro Ac 60H (1:6)	бугорчатые	да, 55	0,795 (0,68)	4 345,491 (244,856)	$3,648 \cdot 10^{-9}$	373 620 (104)	318 821 (89)	1,476
Auge Pro Ac 60 (1:6)	бугорчатые	да, 55	0,76 (0,57)	4 356,912 (68,049)	$5,660 \cdot 10^{-9}$	268 800 (75)	272 882 (75,8)	1,377
Дескам (1:15)	бугорчатые	да, 55	0,33 (0,16)	8 088,054 (325,987)	$7,399 \cdot 10^{-9}$	467 220 (130)	350 511 (97,4)	1,760
Антиржавин (1:15)	бугорчатые	да, 55	0,328 (0,225)	4 917,974 (145,181)	$6,364 \cdot 10^{-9}$	545 820 (152)	650 415 (180,7)	1,651
5 %-ная соляная кислота с уротропином и тиомочевинной	равномерные	нет, 25	1,4 (0,815)	2 330,95 (95,141)	$6,947 \cdot 10^{-9}$	458 614,8 (127,4)	418 058,7 (116,1)	1,034
	бугорчатые	нет, 55	1,4 (0,45)	2 440,98 (385,266)	$6,480 \cdot 10^{-9}$	239 025,6 (66,4)	186 495,6 (51,8)	1,122
	бугорчатые	нет, 55	1,4 (0,87)	1 455,93 (103,75)	$1,149 \cdot 10^{-8}$	192 344,4 (53,4)	93 343,1 (10,9)	2,126

Коэффициент эффективности реагента определяется как отношение количества удаленных к количеству растворенных при ХО отложений.

Анализ результатов, представленных в таблице, показывает, что при ХО как от равномерных, так и от бугорчатых отложений значения УКС ХО реагентом Auge Pro Ac 60 меньше, чем ХО реагентами Дескам и Антиржавин. Это вполне соответствует характеристике реагента Auge Pro Ac 60, как «мягко» работающего реагента, предназначенного для удаления железокислотных медистых отложений и способного растворять магнетит.

Значения УКС «холодной» ХО (при температуре 25 °С) от равномерных отложений больше, чем даже нагретым до температуры 55 °С раствором от бугорчатых отложений, что объясняется меньшей долей пористых отложений в бугорках. Однако вклад диспергирования в ХО от бугорчатых отложений реагентами Auge Pro Ac 60, Дескам и Антиржавин больше, чем при ХО от равномерных отложений.

УКС ХО от равномерных отложений «холодным» моющим солянокислотным раствором и от бугорчатых отложений нагретым до температуры 55 °С солянокислотным раствором практически одинаковы. Вклад разрыхления в ХО соляной кислотой от бугорчатых отложений больше, чем в ХО от равномерных отложений.

По данным [7], слой плотных пристеночных отложений удельной массой от 80 до 150 г/м² имеет объемную долю пор (пористость) около 8–10 %. Пористость наружного наносного слоя равномерных отложений составляет около 30–40 %. Большая пористость обуславливает быструю очистку труб от равномерных отложений.

Бугорчатые отложения возникают как наносные, но развиваются по механизму подшламовой коррозии с уплотнением бугорков со стороны, прилегающей к стали [8]. Длительность ХО максимальна при наличии бугорчатых отложений и необходимости их удаления (см. таблицу и рис. 3).

Относительные значения разностей опытной и расчетной длительности кислотных стадии ХО находятся в пределах от 0,015 до 0,25. Представление ХО в качестве процесса первого порядка относительно удельной загрязненности внутренних поверхностей ТПНК и первого порядка по кислотности моющего раствора позволяет на стадии планирования ХО получить расчетную оценку ее длительности.



Рис. 3. Образец трубы солевого отсека после эксплуатационной ХО

Выводы. На основании полученных опытных данных, учитывая характеристику отложений (двухслойные равномерные железоксидные отложения и двухслойные железоксидные отложения с бугорчатыми участками), можно сделать следующие выводы:

1. Моющее действие проверенных реагентов основано на разрыхлении и растворении отложений. При этом опытные данные о текущих значениях кислотности рабочего раствора и остаточной удельной загрязненности трубного образца позволяют оценить вклад каждого из этих процессов. Вклад разрыхления в ХО раствором соляной кислоты и соответствующее шламообразование меньше, чем при ХО кислотными растворами реагентов Auge Pro Ac 60, Дескам и Антиржавин.

2. Скорость химической очистки пропорциональна удельной загрязненности образцов труб вследствие пористости отложений и кислотности моющего раствора и зависит от составов моющих реагентов, в частности от наличия в них диспергирующих добавок.

3. Численные значения условных констант скорости очистки образцов труб

растворами соляной кислоты и кислотных реагентов Auge Pro Ac 60, Дескам и Антиржавин отличаются незначительно. Численные значения условных констант скорости очистки образцов труб от равномерных отложений имеют большие значения, чем условные константы скорости очистки образцов труб от бугорчатых эксплуатационных отложений.

4. Представление ХО в качестве процесса первого порядка относительно удельной загрязненности внутренних поверхностей ТПНК и первого порядка по кислотности моющего раствора позволяет на стадии планирования ХО получить адекватную расчетную оценку ее длительности.

5. Длительность ХО максимальна при наличии бугорчатых отложений и необходимости их удаления.

6. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при выборе технологии проведения кислотной очистки для установления ее продолжительности с обеспечением заданной остаточной удельной загрязненности поверхности стальных труб в условиях, приемлемых для промышленных объектов.

Список литературы

1. **Маргулова Т.Х.** Химические очистки теплоэнергетического оборудования. – М.: Энергия, 1969. – 174 с.
2. **Будаева А.Ю., Бушуев Е.Н.** Исследование процесса удаления отложений с внутренних поверхностей нагрева паровых котлов // Материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 175-летию со дня рождения Н.Н. Бенардоса. – Иваново, 2017. – Т. 2. – С. 144–147.
3. **Федорова А.Ю., Бушуев Е.Н.** Выбор реагентов и технологических условий химической очистки от отложений испарительных труб паровых котлов // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 5. – С. 11–17.
4. **Воспенников В.В., Зайцев Н.А., Чермошенцев Е.А.** Методика восстановления эффективной работы паровых котлов низкого давления // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 2. – С. 238–246.
5. **Исследование** и выбор оптимального реагента для очистки поверхности от накипи / А.Я. Ухажова, З.Х. Султыгова, Р.Дж. Арчакова и др. // Вестник современной науки. – 2016. – Вып. 9. – С. 19–24.
6. **Разработка** и опыт применения инновационных реагентов для эксплуатационной химической очистки экранных труб энергетиче-

ских котлов / Р. Аглыамов, А. Бунаков, П. Егорушкин и др. // Энергетика. – 2013. – № 3. – С. 26–29.

7. **Богачев А.Ф.** Изучение и предотвращение коррозии металла в зонах фазовых превращений и перегретом паре. – М.: ПМБ ВТИ, 1996. – 136 с.

8. **Шкроб М.С., Прохоров Ф.Г.** Подготовка и водный режим паротурбинных электростанций. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 471 с.

References

1. Margulova, T.Kh. *Khimicheskie ochistki teploenergeticheskogo oborudovaniya* [Chemical cleaning of thermal power equipment]. Moscow: Energiya, 1969. 174 p.

2. Budaeva, A.Yu., Bushuev, E.N. Issledovanie protsessa udaleniya otlozheniy s vnutrennikh poverkhnostey nagreva parovykh kotlov [A study of deposit removal from internal heating surface of steam boilers]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 175-letiyu so dnya rozhdeniya N.N. Benardosa* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference Commemorating the 175th Anniversary of N.N. Benardos' birthday]. Ivanovo, 2017, vol. 2, pp. 144–147.

3. Fedorova, A.Yu., Bushuev, E.N. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 5, pp. 11–17.

4. Vospennikov, V.V., Zaytsev, N.A., Chermoshentsev, E.A. *Metodika vosstanovleniya*

effektivnoy raboty parovykh kotlov nizkogo davleniya [A method of recovering efficient operation of low-pressure steam boilers]. *Izvestiya TuIGU. Tekhnicheskie nauki*, 2014, issue 2, pp. 238–246.

5. Ukhazhova, A.Ya., Sulygova, Z.Kh., Archakova, R.D., Kitieva, L.I., Martazanova, R.M., Evloeva, A.Ya. Issledovanie i vybor optimal'nogo reagenta dlya ochistki poverkhnosti ot nakipi [Analysis and choice of the optimal reagent for cleaning surfaces from scale]. *Vestnik sovremennoy nauki*, 2016, issue 9, pp. 19–24.

6. Aglyamov, R., Bunakov, A., Egorushkin, P., Naumov, O., Ignarina, L. Razrabotka i opyt primeneniya innovatsionnykh reagentov dlya ekspluatatsionnoy khimicheskoy ochistki ekrannykh trub energeticheskikh kotlov [Development and experience in application of innovation reagents for in-service chemical cleaning of water-wall tubes of power generating boilers]. *Energetika*, 2013, no. 3, pp. 26–29.

7. Bogachev, A.F. *Izuchenie i predotvrashchenie korrozii metalla v zonakh fazovykh prevrashcheniy i peregreтом паре* [Studying and preventing of metal corrosion in phase transition areas and in superheated steam]. Moscow: PMB VTI, 1996. 136 p.

8. Shkrob, M.S., Prokhorov, F.G. *Vodopodgotovka i vodnyy rezhim paroturbinnnykh elektrostantsiy* [Water treatment and water conditions of steam turbine power plants]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1961. 471 p.

Федорова Алена Юрьевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры химии и химических технологий в энергетике, e-mail: abdvalenka@mail.ru

Fedorova Alena Yuryevna,

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate student of the Department of Chemistry and Chemical Technologies in Power Engineering, e-mail: abdvalenka@mail.ru

Бушуев Евгений Николаевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, зав. кафедрой теоретических основ теплотехники, телефон 8(4932) 26-99-32, e-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Bushuev Evgeny Nikolayevich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Head of the Theory of Heat Power Engineering Department, telephone 8(4932) 26-99-32, e-mail: zavkaf@tot.ispu.ru