

УДК 621.165:532.6

В.А. ЯКОВЛЕВ, науч. сотр. ИПМаш НАН Украины, г. Харьков

С.В. ЕРШОВ, д-р техн. наук; проф. ИПМаш НАН Украины, г. Харьков

МНОГОРЕЖИМНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПОСЛЕДНЕЙ СТУПЕНИ ЦНД ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

Розглянуто приклад багаторежимної аеродинамічної оптимізації останнього ступеня ЦНТ парової турбіни потужністю 200 МВт. В якості цільової функції обрано зважений ККД ступеня для чотирьох режимів роботи турбіни. Технологія розрахункових досліджень базується на використанні тривимірних моделей розрахунку течії в проточних частинах турбомашин. Пошук екстремуму здійснювався за допомогою методу оптимізації, що побудований на основі гібридизації генетичного алгоритму та прямих методів локального пошуку.

The example of multipoint aerodynamic optimization of low pressure cylinder last stage of the steam turbine by capacity of 200 MW is considered. The weighed stage efficiency for four operating conditions of the turbine is chosen as objective function. The technology of computational investigations is based on the use of 3D flow numerical models for turbomachinery flowpaths. Searching an objective function extremum was carried out by hybrid approach, combining genetic algorithm with local direct search method.

Введение

При модернизации паровых турбин, выработавших свой ресурс, преследуется цель повышения экономичности проточных частей за счет применения нового, аэродинамически совершенного лопаточного аппарата. Существенные резервы содержатся в применении пространственного профилирования лопаточных аппаратов и проточной части турбины в целом. Реализовать это можно путем привлечения современных методов вычислительной аэродинамики (*CFD*) для расчета потока в лопаточных аппаратах турбомашин и применения эффективных математических методов решения задач оптимизации [1–4].

Учитывая, что в настоящее время энергетические турбоагрегаты большой мощности эксплуатируются в широком диапазоне изменения нагрузки, их модернизацию необходимо проводить с учетом переменных режимов работы и реального графика нагрузок. Прежде всего, это относится к модернизации цилиндров низкого давления (ЦНД) паровых турбин и особенно их последних ступеней, от совершенства которых в большой мере зависит экономичность всей проточной части турбины.

В данной работе рассматривается задача многорежимной оптимизации последней ступени ЦНД паровой турбины мощностью 200 МВт.

Постановка задачи и методы расчета

В основу решения задачи аэродинамического совершенствования лопаточных аппаратов проточных частей турбомашин положены следующие методологические принципы:

- использование 3D моделей расчета течения;
- применение эффективных математических методов оптимизации;
- использование прототипов конструкций;
- выбор относительно небольшого набора параметров, изменение которых позволяет управлять пространственной формой лопатки (при этом геометрическая форма профилей лопаток в заданных сечениях остается неизменной).

Задача оптимизации пространственной формы лопаток проточной части турбины, состоящей из одной или нескольких ступеней, формулируется следующим образом: найти экстремум функции цели при ограничениях, накладываемых на режим течения и изменяемые геометрические параметры. Изменение пространственной формы лопаток осуществляется за счет согласованного варьирования их геометрических параметров. При этом выбираются не абсолютные значения параметров, а относительные отклонения от исходной конструкции. Принимается, что эти отклонения либо постоянные вдоль пера лопатки, либо распределены по линейному или нелинейному (парабола, кривая Безье) закону. Условие постоянства режима течения обеспечивается путем введения ограничения на изменение расхода рабочего тела.

При создании и совершенствовании последних ступеней мощных паротурбинных агрегатов выбор целевой функции целесообразно осуществлять на основе интегрального окружного КПД [5], выражающего эффективность преобразования энергии. Кроме того, целевая функция должна также учитывать и переменный режим работы ступени. Поэтому для решения задачи многорежимной оптимизации в качестве функции цели выбран взвешенный КПД ступени с весовыми коэффициентами, соответствующими времени работы турбины на различных режимах ее нагрузки

$$\eta = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \eta_i, \quad w_i = \frac{t_i}{\sum_{k=1}^n t_k}, \quad i = 1 \dots n, \quad (1)$$

где η_i – КПД ступени на i -ом режиме; w_i – весовой коэффициент для i -го режима; t_i – время работы турбины на i -ом режиме; n – число различных режимов работы турбины за рассматриваемый промежуток времени.

В качестве инструментария для решения задачи пространственного профилирования используется разработанный в ИПМаш программный комплекс Optimus-2. Он представляет собой интегрированную среду для проведения оптимизационных исследований и включает в себя математические методы локальной оптимизации (метод деформированного многогранника Нелдера-Мида, метод Торкзон), глобальной оптимизации (генетический алгоритм), а также методы, основанные на идеях гибридизации (комбинация генетического алгоритма и прямых методов локального поиска) [6].

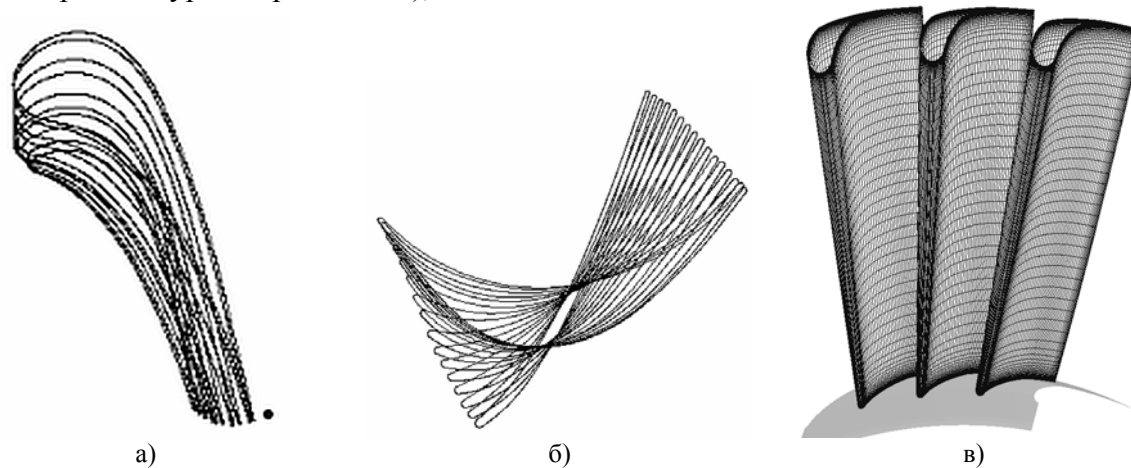
Расчеты трехмерного течения выполняются с помощью *CFD* солвера FlowER [7], в котором реализована численная модель трехмерного вязкого течения, построенная на основе решения системы нестационарных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (*RANS*). Для моделирования турбулентных эффектов применяется двухпараметрическая дифференциальная модель турбулентности $k-\omega$ SST Ментера. Численное решение системы дифференциальных уравнений выполняется с использованием неявной квазимонотонной ENO-схемы второго порядка аппроксимации.

Анализ исходной конструкции

В качестве объекта исследования рассмотрена последняя ступень одной из модификаций ЦНД паровой турбины К-200-130 (рис. 1). Геометрические характеристики ступени даны в табл. 1. Граничные условия на входе ступени задавались с фиксацией полного давления и полной температуры, а на выходе

выставлялось статическое давление (табл. 2) для каждого из рассматриваемых режимов.

Для анализа исходной конструкции выполнены расчеты трехмерного вязкого течения в исследуемой ступени на всех четырех режимах на достаточно мелкой сетке (сетке третьего уровня разбиения), с общим числом ячеек $2 \times 72 \times 60 \times 88 = 760320$.



а – набор сечений лопатки НА; б – набор сечений лопатки РК;
в – трехмерное изображение лопаток НА

Рис. 1. Лопатки исходной ступени

Таблица 1

Геометрические характеристики последней ступени ЦНД

Параметр	Статор	Ротор
Относительная длина лопатки, l/b^*	3,42	6,95
Относительный шаг решетки, t/b^*	0,77	0,59
Веерность решетки, $D_{ср}/l$	3,1	2,95
Число лопаток, z	42	94
Эффективный угол выхода потока $\alpha_{1эф}, \beta_{2эф}$, град [*]	14,8	31,61

* по среднему сечению

Таблица 2

Граничные условия и расход

Режим	$P_{вх}$, Па	$T_{вх}$, К	$P_{вых}$, Па	G , кг/с
1	29250	362,8	12300	54,36
2	29250	362,8	8000	54,36
3	29250	362,8	5000	54,36
4	29250	362,8	3500	54,36

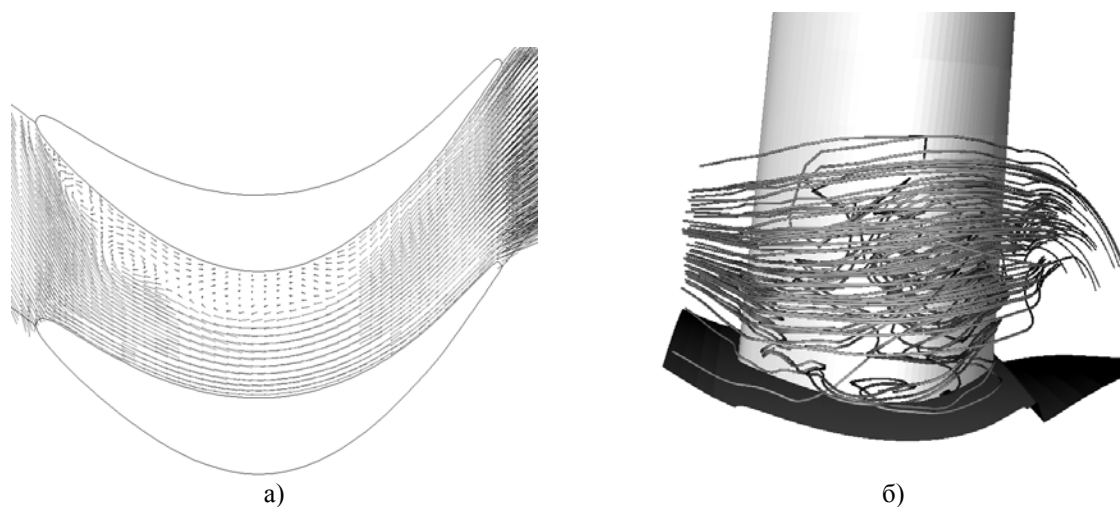
Анализ результатов расчетов 3D вязкого течения в исходной ступени показал, что:

- в средних сечениях рабочего колеса (РК) на стороне разрежения имеются существенные немоности давления, вызванные отрывом на входной кромке;
- в корневых сечениях реактивность ступени отрицательная, что приводит к отрыву потока в РК, который полностью занимает прикорневые сечения и распространяется почти на 2/3 высоты лопатки в районе стороны разрежения (рис. 2).

Для совершенствования конструкции было решено выполнить ряд оптимизационных исследований, цель которых не только улучшить качественную картину течения, но и повысить экономичность ступени.

Оптимизация ступени паровой турбины

Одно из исследований по оптимизации данной ступени было выполнено авторами ранее и его результаты опубликованы в [8]. Однако оптимизация ступени в [8] выполнялась на режиме максимального КПД турбины, с давлением за ступенью 8,0 кПа. Затем осуществлялся расчет течения на остальных режимах работы турбины. Улучшение характеристик течения было получено в основном за счет использования саблевидной формы лопаток направляющего аппарата.



а – векторы скорости в прикорневом сечении; б – линии тока

Рис. 2. РК исходной ступени

В данной работе приведены результаты исследований по многорежимной оптимизации рассматриваемой ступени с выбором наиболее представительных режимов работы турбин данного типа.

Учитывая существенную зависимость режимов работы турбин от условий эксплуатации (климат региона, источник охлаждающей воды и др.), весовые коэффициенты, входящие в целевую функцию, целесообразно выбирать на основании существующих графиков сезонных и годовых нагрузок или по данным вахтовых журналов для конкретного энергоблока. В данной работе выбор весовых коэффициентов для целевой функции (1) опирался на публикации по оценке и анализу работы ЦНД мощных паровых турбин в условиях работы конкретных электростанций Украины [9, 10]. Для рассматриваемых четырех режимов работы (1–4) значение этих коэффициентов составило: 0,33; 0,33; 0,17; 0,17.

Оптимизация ступени выполнялась с помощью гибридного метода, построенного на базе последовательного подхода [6]. На первом этапе с помощью генетического алгоритма приближенно определялся глобальный экстремум целевой функции. Так как реализация генетического алгоритма требует большого количества вычислений функции цели, то на этом этапе солвер *FlowER* работал с достаточно грубой сеткой (первого уровня разбиения – 11880 ячеек). На втором этапе значение

оптимума уточнялось методом локального поиска (Нелдера-Мида). Этот этап выполнялся с использованием в солвере сетки второго уровня (95040 ячеек). Оптимизация проводилась по семи параметрам, шесть из которых относились к направляющему аппарату (НА):

- угол установки лопатки;
- крутка лопатки (угол поворота каждого сечения относительно корневого в плоскости сечения) с линейным законом распределения по высоте;
- угол осевой саблевидности на периферии;
- длина осевой саблевидности на периферии;
- угол окружной саблевидности у корня;
- длина окружной саблевидности у корня;

и один к рабочему колесу – угол установки рабочей лопатки.

Помимо прямых ограничений на параметры накладывалось ограничение на изменение расхода рабочего тела в диапазоне $\pm 1,0$ кг/с (1,8 %) от исходного.

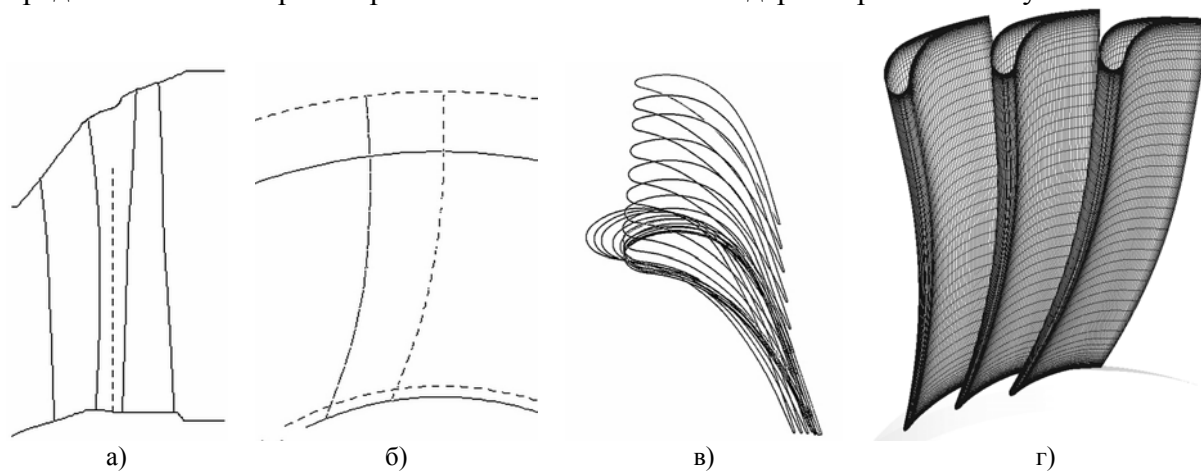
В результате оптимизации наиболее существенно изменились параметры, характеризующие саблевидность лопатки:

- угол осевой саблевидности на периферии $-6,7^\circ$ при длине участка саблевидного искривления 0,4 высоты лопатки;
- угол окружной саблевидности у корня $24,3^\circ$ при длине участка саблевидного искривления 0,6 высоты лопатки.

Угол установки лопатки РК изменился на $2,7^\circ$, а изменение параметров угла установки и крутки лопатки НА оказалось незначительным (менее $1,0^\circ$).

Для полученной конструкции были проведены аэродинамические расчеты всех рассматриваемых режимом с использованием мелкой сетки (третьего уровня разбиения).

Вид оптимизированной лопатки НА представлен на рис. 3. На рис. 4 представлены векторы скорости и линии тока в РК модернизированной ступени.



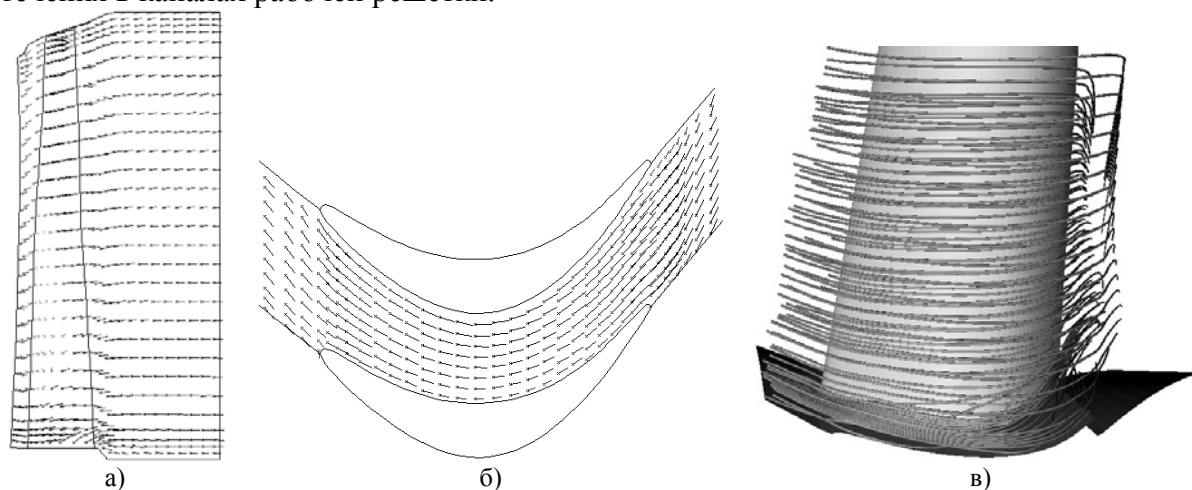
a – меридиональное сечение; *б* – поперечное сечение НА;
в – набор сечений лопатки НА; *г* – трехмерное изображение лопаток НА

Рис. 3. Лопатки модернизированной ступени

За счет оптимизации лопаток НА значительно улучшилась структура течения. Увеличение реактивности в прикорневой зоне РК привело к уменьшению отрывов.

Уменьшились радиальные перетекания на стороне разрезания РК, вызванные вторичными течениями. В результате уменьшились потери кинетической энергии, и повысился КПД ступени. График КПД для различных режимов приведен на рис. 5.

В обоих случаях – как при однорежимной оптимизации выполненной авторами ранее [8], так и в настоящем исследовании получены довольно близкие результаты. Это объясняется, прежде всего, тем, что при выполнении оптимизации выбиралось одинаковое множество геометрических параметров, ориентированных на получение саблевидных лопаток НА, что, в свою очередь, должно было улучшить характер течения в каналах рабочей решетке.



а – векторы скорости на стороне разрезания;
б – векторы скорости в прикорневом сечении; в – линии тока

Рис. 4. РК модернизированной ступени

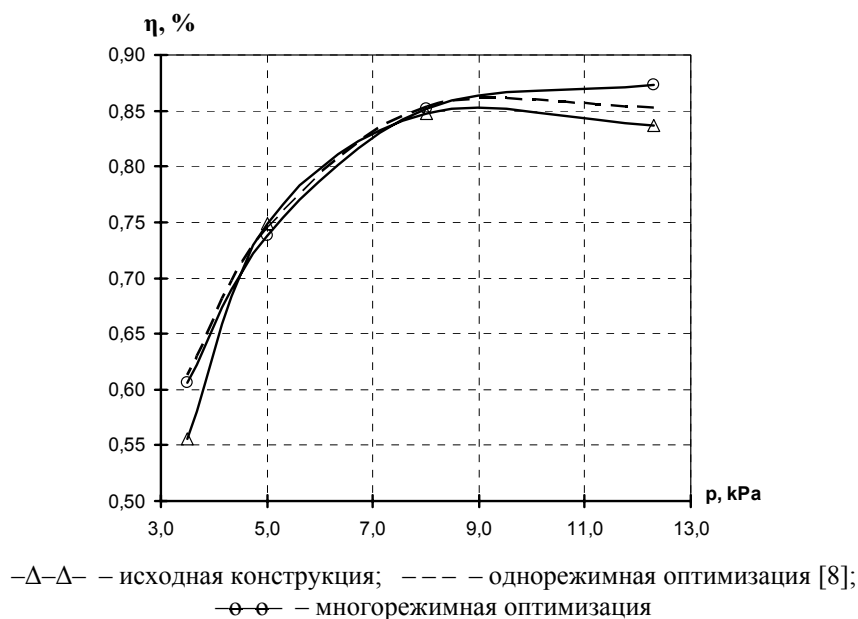


Рис. 5. Зависимость КПД ступени от режимов работы турбины

Заключение

– С использованием 3D моделей расчета течения выполнена многорежимная оптимизация последней ступени ЦНД паровой турбины мощностью 200 МВт.

– Использование полученной в результате оптимизации конструкции с саблевидными лопатками НА приводит к уменьшению радиальных и поперечных градиентов в зонах формирования вторичных течений при обтекании рабочих лопаток и, как следствие, уменьшению интенсивности вторичных течений у корня на всех рассматриваемых режимах.

– Увеличение осевого зазора на периферии (за счет саблевидности направляющих лопаток) должно уменьшить опасность эрозии рабочих лопаток для ступени, работающей на влажном паре.

– Несмотря на небольшое снижение КПД ступени на некоторых режимах по сравнению с однорежимной оптимизацией (рис. 5), осредненный по всем режимам КПД ступени (см. зависимость (1)) повысился на 0,4 %.

Благодарность

Авторы выражают признательность сотрудникам ИПМаш НАН Украины члену-корреспонденту НАН Украины Шубенко А.Л. и члену-корреспонденту НАН Украины Тарелину А.А. за интерес, проявленный к работе, и полезное обсуждение полученных результатов.

Список литературы: 1. Torre A. Latest Developments and Perspectives in the Optimised Design of LP Steam Turbines at ANSALDO / A. Torre, S. Cecchi // 7th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, Athens, Greece. – 2007. – P. 19–40. 2. Demeulenaere A. Three-dimensional inverse method for turbomachinery blading design / A. Demeulenaere, R.V. Braembussche // Computational Fluid Dynamics '96., Proceedings, 3rd ECCOMAS Computational Fluid Dynamics Conf., J.-A.Desideri et al., eds, John Willey & Sons Ltd, Chichester, West Sussex, England. – 1996. – P. 965–971. 3. Lampart P. Direct Constrained Computational Fluid Dynamics Based Optimization of Three-Dimensional Blading for the Exit Stage of a Large Power Steam Turbine / P. Lampart, S. Yershov // Transactions of the ASME. Journal Engineering for Gas Turbines and Power. – 2003. – 125, No 1. – P. 385–390. 4. Бойко А.В. Аэродинамический расчет и оптимальное проектирование проточной части турбомашин / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорушенко, С.В. Ершов, А.В. Русанов, С.Д. Северин. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – 356 с. 5. Тарелин А.А. Основы теории и методы создания оптимальной последней ступени паровых турбин / А.А. Тарелин, Ю.П. Антипцев, И.Е. Аннопольская. – Харьков: Контраст, 2001. – 224 с. 6. Haupt R.L. Practical genetic algorithms / R.L. Haupt, S.E. Haupt – 2nd ed. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004. – 253 p. 7. Ершов С.В. Комплекс програм розрахунку тривимірних течій газу в багатовінцевих турбомашинах «FlowER»: свідоцтво про державну реєстрацію прав автора на твір, ПА № 77; 19.02.96/ С.В. Ершов, А.В. Русанов. – Державне агентство України з авторських та суміжних прав, 1996. – 1 с. 8. Русанов А.В. Аэродинамическое усовершенствование последней ступени цилиндра низкого давления паровой турбины мощностью 200 МВт / А.В. Русанов, С.В. Ершов, Н.В. Пашенко, В.А. Яковлев // Пробл. машиностроения. – 2007. – 10, № 4. – С. 53–61. 9. Слабченко О.Н. Оценка эффективности работы ЦНД турбины Т-250/300-23,5 Харьковской ТЭЦ-5 / О.Н. Слабченко, М.В. Зайцев, А.Ю. Козлоков, А.Д. Золотухин // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. научн. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – № 3. – С. 41-48. 10. Зайцев М.В. Выбор варианта паровой турбины в зависимости от условий ее работы / М.В. Зайцев, Е.В. Левченко, Б.А. Аркадьев // Теплоэнергетика. – 1996. – № 3. – С. 64-67.

© Яковлев В.А., Ершов С.В., 2010
Поступила в редколлегию 28.02.10