УДК 662.99: 536.21

О. П. Шураев, С. Н. Валиулин, Д. И. Бевза

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОТРУБНОГО КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА

Описан численный эксперимент, выполненный в студенческой версии пакета конечно-элементного анализа ELCUT на основе математической модели одного из наиболее термически нагруженных узлов (газовая камера – корпус) газотрубного утилизационного котла, изложены результаты эксперимента. Задачами моделирования являлись определение полей температур и градиентов температур для вариантов обечайки газовой камеры с наличием и отсутствием теплоизоляционной вставки, а также количественная и качественная оценка термического состояния воротника котла-утилизатора для обоих рассматриваемых случаев. Описана подготовка вычислительного эксперимента: создание геометрической модели исследуемого узла в виде набора блоков с индивидуальным комплексом свойств для каждого из них; задание граничных условий 3-го рода на поверхностях контакта сред; ввиду конструктивной сложности модели и ограничений, наложенных студенческой версией пакета ELCUT, шаг конечно-элементной сетки задавался вручную. Результаты численного моделирования доказали целесообразность снижения градиента температур в металле газовой камеры вдоль ее оси, общего снижения температур в исследуемом элементе путем установки теплоизоляционной вставки, а также подтвердили достаточно высокий уровень напряжений, возникающих в обечайке газовой камеры, не имеющей изоляции. В итоге определен наиболее опасный участок корпуса воротника котла-утилизатора и получена информация о температурном состоянии элементов корпуса воротника для вариантов с наличием и отсутствием теплоизоляционной вставки, свидетельствующая о возможности двукратного снижения градиентов температур вдоль образующей газовой камеры и, соответственно, о возможности двукратного снижения температурных напряжений в наиболее нагруженной зоне.

Ключевые слова: теплопередача, термические напряжения, математическое моделирование, температурное поле, теплоизоляционная вставка, воротник котла-утилизатора.

Введение

Газотрубные котлы-утилизаторы теплоты отработавших газов дизелей получили распространение на судах речного флота благодаря ряду положительных свойств, среди которых простота и неприхотливость в эксплуатации, удобство компоновки, невысокая стоимость. Среди недостатков – низкая тепловая эффективность, ограниченный типоразмерный ряд в области высоких мощностей.

Одной из причин, препятствующих созданию мощных газотрубных котлов, является недопустимый рост термических напряжений, связанный со значительной разностью температур теплообменных труб, корпуса и цилиндрической камеры подвода газов. Для нейтрализации последствий осевых температурных деформаций корпуса и труб могут быть использованы стандартные гибкие элементы, например, гофрокомпенсаторы. Разность температурных расширений корпуса и камеры подвода газов компенсировать весьма сложно.

Анализ известных вариантов конструкций

Одно из возможных решений данной задачи – фланцевое соединение корпуса котла и газовой камеры (рис. 1).

Фланцевое соединение при этом имеет некоторую подвижность в радиальном направлении. В условиях эксплуатации уплотнительный узел постепенно теряет плотность и перестает выполнять свою функцию.

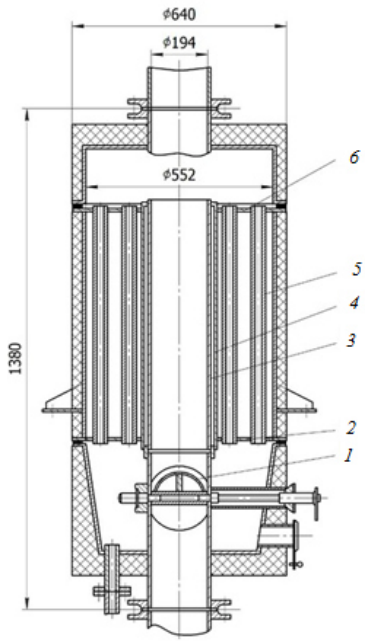


Рис. 1. Котёл-утилизатор КАУ-4,5: *1* – шиберная заслонка; *2* – передняя трубная доска; *3* – байпасная труба; *4* – экран; *5* – трубный пучок; *6* – задняя трубная доска

Другое решение – жесткое сварное соединение камеры и корпуса (рис. 2). Жесткость и плотность в этом случае обеспечивается, однако в районе соединения этих элементов возникают высокие термические напряжения, связанные с большой разностью температур корпуса и газовой камеры, достигающей 300 °С и более.

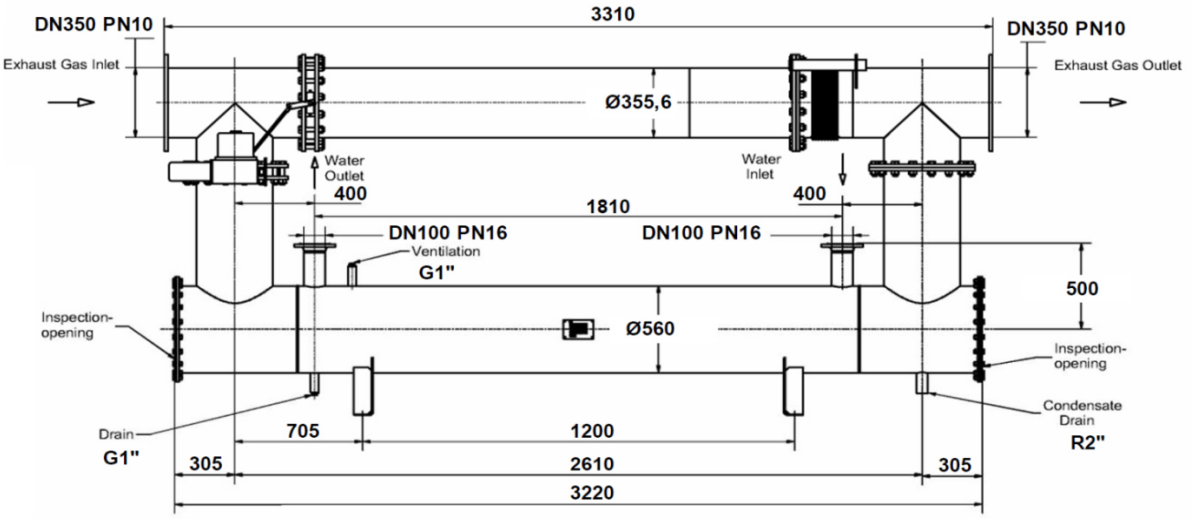


Рис. 2. Котёл-утилизатор фирмы APROVIS

На наш взгляд, простым и перспективным путем решения данной проблемы может быть сглаживание эпюра изменения температуры металла цилиндрической камеры в осевом направлении в зоне контакта с корпусом. С этой целью мы предлагаем использовать теплоизоляционную вставку во внутренней части газовой камеры (рис. 3). Для определения эффективности данной процедуры, подбора изоляционного материала и его геометрических характеристик выполнено математическое моделирование температурного состояния элементов котла-утилизатора, включая часть корпуса и газовой камеры.

Основная задача исследования – рассчитать поле температур и градиентов температур в воротнике газотрубного утилизационного котла согласно прилагаемому эскизу (рис. 3).

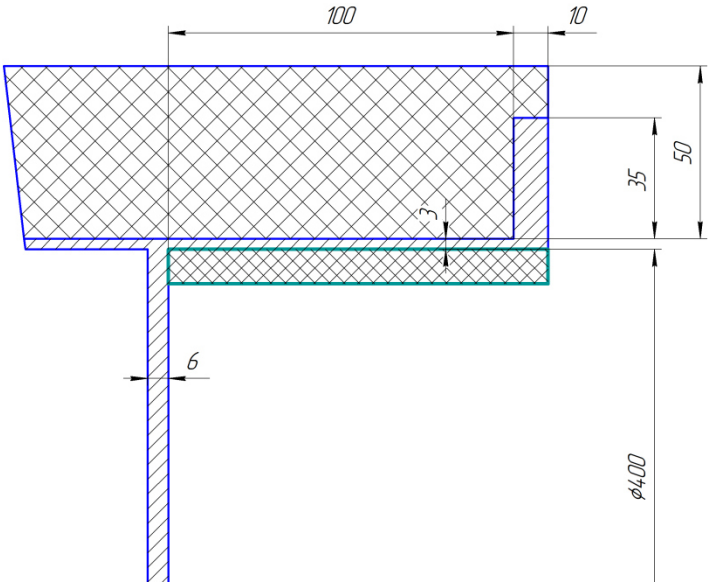


Рис. 3. Эскиз конструкции воротника

После выполнения расчета исходной конструкции следует рассмотреть варианты температурного поля при наличии изоляционного слоя, выделенного на рис. 3 утолщенной линией.

Программное обеспечение расчетов

Для выполнения расчетов стационарной и нестационарной теплопроводности в твердых телах могут применяться разные вычислительные программы, например, ANSYS, NX Nastran, FlowVision и др. Большинство пакетов конечно-элементного анализа работает с трехмерной геометрией, подготовка которой, с учетом конвертации через различные форматы графических файлов, занимает значительное количество времени [1]. Немаловажным фактором является и стоимость этих программ. С другой стороны, учитывая, что рассматриваемая задача может быть представлена как осесимметричная и не требующая разбиения на большое число конечных элементов, для выполнения расчетов оказалась пригодной студенческая версия пакета ELCUT[1].

Программа ELCUT является мультизадачным пакетом и, среди прочих задач, позволяет выполнять линейный и нелинейный температурный анализ в плоской и осесимметричной постановке. Формулировка задачи основывается на уравнении теплопроводности с граничными условиями радиационного и конвективного теплообмена.

При постановке задачи программа предоставляет следующие возможности [2]:

– задание свойств сред: материалы с постоянной теплопроводностью, изотропные материалы с теплопроводностью и теплоемкостью, зависящими от температуры;

– задание источников поля: постоянные и зависящие от температуры объемные источники тепловой мощности, конвективные и радиационные источники;

– постановка граничных условий (ГУ): заданная температура (ГУ 1-го рода), заданный тепловой поток на границе (ГУ 2-го рода), условия радиационного и конвективного теплообмена (ГУ 3-го рода), а также поверхности с постоянной, не известной изначально температурой.

Результатами расчета задачи теплопроводности являются температура, градиент температуры, плотность теплового потока и интегральные значения теплового потока через заданные поверхности. Кроме того, для нестационарной задачи строятся графики и таблицы изменения указанных выше физических величин во времени.

Программа ELCUT позволяет решать задачи теплопередачи в линейной и нелинейной постановках. При решении тепловых задач используется уравнение теплопроводности в одном из видов:

– для линейных задач:

[1] Производственный кооператив «Тор». URL: www.elcut.ru.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}\right)=-q-c\rho\frac{\partial T}{\partial t}$$ – в плоском случае;

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda_r r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}\right)=-q-c\rho\frac{\partial T}{\partial t}$$ – в осесимметричном случае;

– для нелинейных задач:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right)=-q(T)-c(T)\rho\frac{\partial T}{\partial t}$$ – в плоском случае;

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right)=-q(T)-c(T)\rho\frac{\partial T}{\partial t}$$ – в осесимметричном случае,

где T – температура, К; t – время; $\lambda_{x\ (y,\ z,\ r)}$ – компоненты тензора теплопроводности (в линейной постановке), Вт/(м · К); $\lambda(T)$ – теплопроводность как функция температуры, представленная кубическим сплайном (анизотропия не поддерживается в нелинейной постановке), Вт/(м · К); $q(T)$ – удельная мощность тепловыделения, в линейной постановке – константа, в нелинейной постановке – задаваемая кубическим сплайном функция температуры, Вт/м^2; $c(T)$ – удельная теплоемкость, в нелинейном случае это функция температуры, аппроксимированная кубическими сплайнами, кДж/(кг · К); ρ – плотность, кг/м^3. Все параметры уравнений в линейной постановке постоянны в пределах каждого блока модели.

Описание задачи в программе ELCUT

Рассматриваемую задачу определяем в ELCUT как осесимметричную (ось симметрии совпадает с осью абсцисс) задачу стационарной теплопередачи.

Геометрические условия определены согласно эскизу (рис. 3). Твердые тела определены как два (три - в случае наложения изоляции с внутренней стороны воротника) блока с индивидуальным набором свойств.

Физические условия определены следующим образом:

– блок {Сталь 12Х18Н10Т} - теплопроводность λ = 14 Вт/(м · К);

– блок {Базальт} - теплопроводность λ = 0,04 Вт/(м · К);

– блок {Изоляция} - теплопроводность λ = 0,1 Вт/(м · К).

Начальные условия, в силу стационарности задачи, не определялись.

На поверхностях теплообмена заданы *граничные условия 3-го рода*. Они описывают конвективный теплообмен и определяются следующим образом:

$$F_n=\alpha(T-T_0),$$

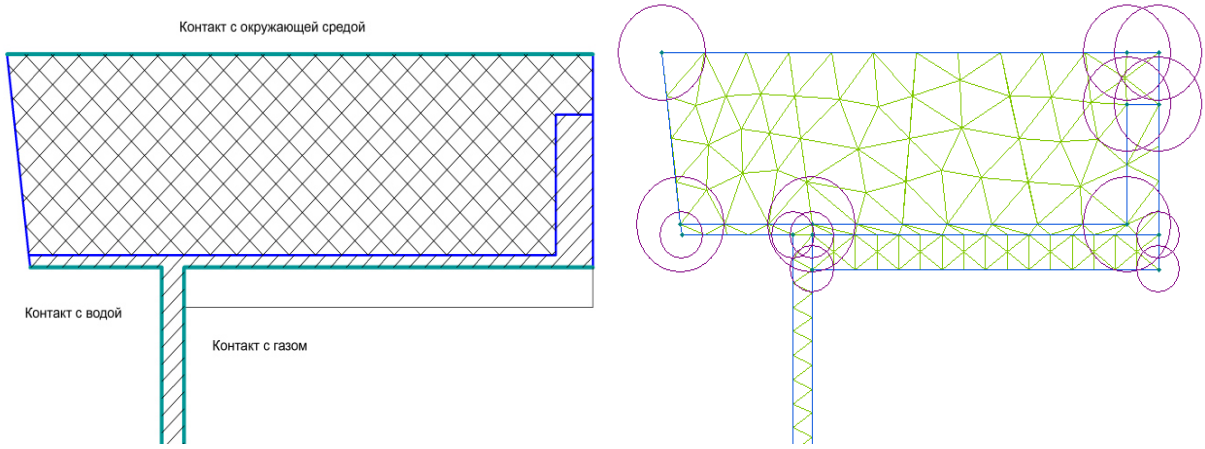
где α – коэффициент теплоотдачи; T_0 – температура среды, контактирующей с твердым телом. Параметры α и T_0 могут меняться от ребра к ребру.

Условие {Контакт с газом} устанавливается на поверхностях, омываемых продуктами сгорания (ПСГ): коэффициент теплоотдачи α = 35 Вт/(м^2 · К); температура ПСГ T_{f1} = (600 + 273) = 873 К.

Условие {Контакт с водой} устанавливается на поверхностях, омываемых водой: коэффициент теплоотдачи α = 1000 Вт/(м^2 · К); температура воды T_{f2} = (90 + 273) = 363 К.

Условие {Контакт с окружающей средой} устанавливается на поверхностях, омываемых воздухом окружающей среды: коэффициент теплоотдачи α = 5 Вт/(м^2 · К); температура воздуха T_{f3} = (25 + 273) = 298 К.

Поверхности теплообмена показаны на рис. 4. При включении в расчет блока {Изоляция} граничное условие {Контакт с газом} переносится на внешнюю поверхность этого блока.



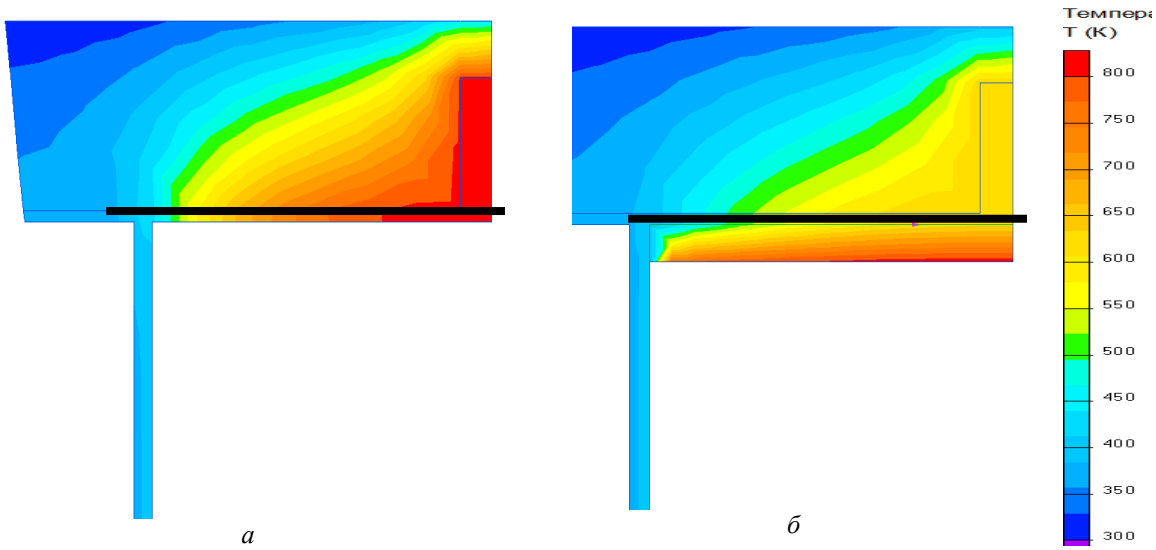
а *б*

Рис. 4. Задание граничных условий *(а)* и конечно-элементная сетка *(б)*

Конечно-элементная сетка в программе ELCUT генерируется в автоматическом режиме (рис. 4). Однако в свободно распространяемой студенческой версии программы максимальное количество элементов ограничено 255-ю. Для конструкций сложной формы в этом случае необходимо вручную задать шаг конечно-элементной сетки (на рис. 4 он показан в виде окружностей) в каждом блоке. Для блока {Сталь 12Х18Н10Т} шаг 7 мм; для блока {Базальт} шаг сетки 14 мм; для блока {Изоляция} – 7 мм.

Результаты расчета

На рис. 5 изображено температурное поле при отсутствии слоя изоляции и с нанесенным изоляционным покрытием.



а *б*

Рис. 5. Температурное поле: без изоляции *(а)*, с изоляцией поверхности воротника *(б)*

Программа ELCUT позволяет построить график изменения какой-либо рассчитываемой величины вдоль заданной линии. График изменения температуры по прямой (слева направо), изображенной на рис. 5 черной утолщенной линией, обработанный с помощью программы GetData Graph Digitizer (автор – С. Федоров) для совмещения в Microsoft Excel, показан на рис. 6.

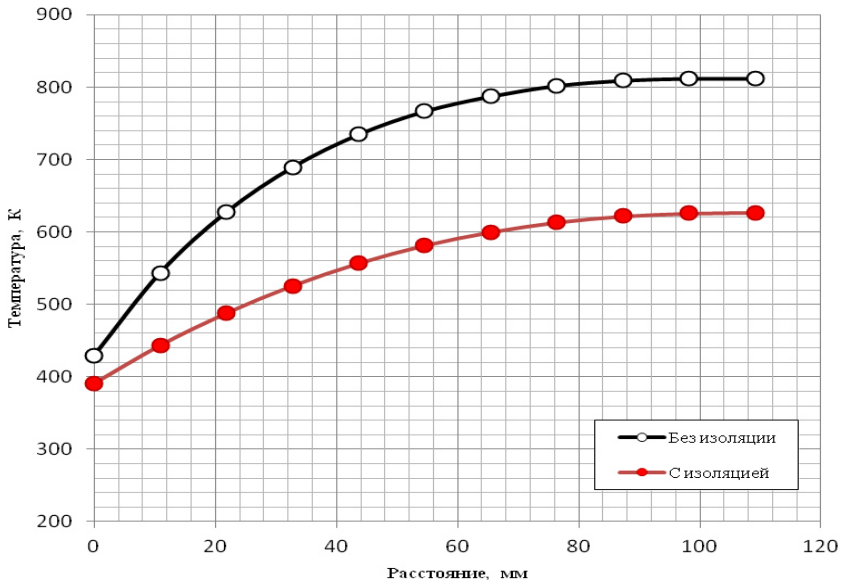


Рис. 6. Изменение температуры вдоль прямой

Видно, что наложение изоляции на внутреннюю поверхность воротника (блок {Изоляция}) позволяет уменьшить температуру в сходственных точках конструкции на величину от 40 К (в зоне приварки трубной доски) до 190–200 К (около фланца).

По данным работы [3], параметром, определяющим термические напряжения в неравномерно нагретой обечайке (в данном случае – воротнике) является величина градиента температур $\frac{dT}{dx}$, где x – осевая координата. В исходном варианте конструкции grad(T) имеет максимальное значение 11 400 К/м в области соединения воротника с трубной доской. В варианте с теплоизоляцией градиент температур в том же месте снижается до 5 320 К/м, т. е. в 2 раза. Для количественной оценки эффективности мер по сглаживанию температурной кривой вдоль оси x и снижению температурных напряжений воспользуемся формулами [3] для напряжений в неизотермической тонкой обечайке:

$$\sigma_x = \pm \frac{\alpha_T \operatorname{grad}(T) \beta r_0 E h}{4(1-\nu^2)};$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{h}(N_\theta)_{x=0} - \frac{6}{h^2}(M_\theta)_{x=0};$$

где σ_x и σ_θ – нормальные напряжения, действующие на площадках, ограничивающих элемент оболочки по линейной координате x и меридианному углу θ; α_T – коэффициент линейного теплового расширения (для стали 12Х18Н10Т $\alpha_T = 14{,}1 \cdot 10^{-6}$ 1/К;

$$\beta = \left[\frac{3(1-\nu^2)}{r_0^2 h^2}\right]^{0{,}25},$$

где r_0 = 0,2 – радиус образующей обечайки, м; E = 180 – модуль упругости, ГПа; h = 0,003 – толщина обечайки, м; ν = 0,3 – коэффициент Пуассона;

$$(N_\theta)_{x=0} = \frac{\alpha_T \operatorname{grad}(T) E h}{4\beta};$$

$$(M_\theta)_{x=0} = \nu \frac{\alpha_T \operatorname{grad}(T) \beta r_0 E h^3}{24(1-\nu^2)}.$$

Расчет для начальных условий нагрева воротника показывает, что наибольшее значение из 2-х компонентов напряжений σ_x составляет около 250 МПа, что превышает номинально допустимые напряжения для стали 12Х18Н10Т и приближается к пределу текучести α_T при расчетной температуре, что делает невозможной сколько-нибудь длительную эксплуатацию воротника исходной конструкции. Вариант с теплоизоляцией позволяет снизить σ_x до 125 МПа и обеспечить нормальную эксплуатацию данного конструктивного элемента.

Заключение

Результаты моделирования температурного поля в деталях утилизационного котла позволяют сделать следующие выводы:

1. Учитывая, что рассматриваемые детали утилизационного котла имеют ось симметрии, задачу расчета температурного поля можно представить как двумерную (осесимметричную) и использовать для ее решения пакет конечно-элементного анализа ELCUT.

2. Без изоляции внутренней поверхности воротника утилизационного котла температура на ней достигает 815 К, причем градиент температуры достигает 11 400 К/м в области соединения воротника с трубной доской.

3. Установка изоляции внутренней поверхности воротника позволяет в 2 раза уменьшить градиент температур в осевом направлении и, соответственно, в 2 раза снизить термические напряжения в наиболее опасном месте воротника.

4. Наиболее опасные напряжения в нагретом воротнике котла возникают в месте соединения обечайки воротника с трубной доской.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шураев О. П.* Моделирование в среде Flow Vision некоторых тепловых и гидродинамических процессов в элементах судовых энергетических установок // Вестн. Волж. гос. акад. водн. транспорта. 2006. № 20. С. 177–180.

2. *Elcut.* Руководство пользователя. URL: www.elcut.ru/free_doc_r.htm.

3. *Коваленко А. Д.* Основы термоупругости. Киев: Наукова думка, 1970. 308 с.

Статья поступила в редакцию 05.09.2016

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шураев Олег Петрович – Россия, 603950, Нижний Новгород; Волжский государственный университет водного транспорта; канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры эксплуатации судовых энергетических установок; eseu@vgavt-nn.ru.

Валиулин Сергей Николаевич – Россия, 603950, Нижний Новгород; Волжский государственный университет водного транспорта; канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры эксплуатации судовых энергетических установок; eseu@vgavt-nn.ru.

Бевза Денис Игоревич – Россия, 603950, Нижний Новгород; Волжский государственный университет водного транспорта; аспирант кафедры эксплуатации судовых энергетических установок; eseu@vgavt-nn.ru.

O. P. Shurayev, S. N. Valiulin, D. I. Bevza

THE CALCULATING RESEARCH OF IMPROVING POSSIBILITY OF THE THERMAL STATE OF GAS-TUBE EXHAUST BOILER'S ELEMENTS

Abstract. The numerical experiment is described, made in the student version of the finite element analysis ELCUT software based on a mathematical model of one of the most thermally loaded units (gas chamber – building) of the gas-tube exhaust boiler, the results of the experiment are

set out. The objectives of the modeling are to determine the fields of temperature and temperature gradients of the shell of the gas chamber options with and without thermal insulation inserts, as well as quantitative and qualitative evaluation of the thermal state of the exhaust boiler's neck for both cases. The preparation of numerical experiment is described: the creation of a geometric model of the test site in the form of a set of blocks with an individual set of properties for each of them; assignment of the 3-rd class boundary conditions in the media of contact surfaces; due to the structural complexity of the model and the limitations imposed by the student version of the software ELCUT, the step of finite element grid was set manually. The numerical modeling results proved advisability of reducing the temperature gradient in the metal of the gas chamber along its axis, reducing the overall temperature in the experimental element by installing heat-insulating insertion, as well as sufficiently confirmed exactly a high level of stresses in the shell of the gas chamber, which has no insulation. As a result, the most dangerous section of the exhaust boiler's neck case was determined and the information on the state of the temperature of the neck case elements for options with and without thermal insulation insert was provided, indicating the possibility of double reduction of temperature gradients along the generator of the gas chamber and, accordingly, the possibility of double reduction of thermal stresses in the most loaded zone.

Key words: heat transfer, thermal stress, mathematical modeling, temperature field, thermal insulation insert, exhaust boiler's neck.

REFERENCES

1. Shurayev O. P. Modelirovanie v srede Flow Vision nekotorykh teplovykh i gidrodinamicheskikh protsessov v elementakh sudovykh energeticheskikh ustanovok [Modeling of some thermal and hydrodynamic processes in the elements of ship power plants in the medium of Flow Vision]. *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta*, 2006, no. 20, pp. 177–180.

2. *Elcut. Rukovodstvo pol'zovatelia* [User's manual]. Available at: www.elcut.ru/free_doc_r.htm.

3. Kovalenko A. D. *Osnovy termouprugosti* [Fundamentals of thermoelasticity]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1970. 308 p.

The article submitted to the editors 05.09.2016

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shurayev Oleg Petrovich – Russia, 603950, Nizhny Novgorod; Volga State University of Water Transport; Candidate of Technical Science, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Operation of Ship Power Plants; eseu@vgavt-nn.ru.

Valiulin Sergey Nikolaevich – Russia, 603950, Nizhny Novgorod; Volga State University of Water Transport; Candidate of Technical Science, Assistant Professor; Assistant Professor The Department of Operation of Ship Power Plants; eseu@vgavt-nn.ru.

Bevza Denis Igorevich – Russia, 603950, Nizhny Novgorod; Volga State University of Water Transport; Postgraduate Student of the Department of Operation of Ship Power Plants; eseu@vgavt-nn.ru.