

Энергомоделирование для расчета систем рекуперации тепла

В последние десятилетия основная часть затрат при эксплуатации морских судов напрямую связана с расходом топлива. Внедрение более жестких регламентов со стороны Международной Морской Организации и ЕС, направленных на сокращение выбросов CO_2 , оказывает дополнительное давление на эксплуатирующие и проектные организации морских судов, вынуждая их находить более эффективные методы преобразования энергии и, таким образом, побуждая двигаться в направлении экономии расхода топлива.

Традиционно подходы к эффективному использованию энергии на судах были основаны на оптимизации отдельных компонентов энергосистемы. В последнее время с развитием численного моделирования распределения энергии проектные и эксплуатационные решения, применяемые на судах, могут быть рассчитаны с учетом полной энергетической эффективности системы. Статья описывает возможности обновленной версии библиотеки “Энергетические системы корабля” (Ship Energy Systems, SES) программного обеспечения для моделирования мультифизических процессов SimulationX компании ESI ITI, в которую добавлены системы рекуперации тепла (Waste Heat Recovery, WHR). Данное ПО позволяет осуществлять моделирование термодинамических свойств всей бортовой энергетической системы, включая главный и вспомогательные двигатели, насосы, турбины и теплообменники.

Энергия, используемая на борту судов, может быть классифицирована по нескольким типам: химическая, механическая, тепловая, электрическая и проч. При этом даже в самых эффективных двигателях только около 50% энергии, получаемой в результате сжигания топлива, преобразуется в энергию движения судна. Остальное выбрасывается в окружающую среду в виде тепловой энергии через систему охлаждения (~ 20%) и систему выброса выхлопных газов (~ 25%).

Зачастую разработка и эксплуатация энергетических систем в судостроении основывается на опыте прошлых лет. В последнее десятилетие благодаря повышению требований к энергоэффективности число компаний, использующих энергетическое моделирование и исследующих данную тематику, резко увеличилось. Использование компьютерного моделирования энергосистем позволяет смоделировать различные режимы их эксплуатации.

Библиотека Ship Energy Systems была разработана для моделирования основных компонентов оборудования судов с упором на преобразование механической и

электрической энергии основных и вспомогательных систем. Двигатели и вспомогательные системы могут быть смоделированы и рассчитаны одновременно с учетом их режимов эксплуатации, то есть с учетом изменения условий окружающей среды, режимов работы двигателя и потребляемой электроэнергии. При выполнении расчетов библиотека SES может использоваться для проектного анализа и выявления возможности модификации систем.

Функционал моделирования расширен за счет разработки компонентов систем рекуперации тепла, более подробно описанных ниже. Одной из главных целей моделирования систем рекуперации тепла является получение данных об общем количестве дополнительно произведенной энергии и снижении расхода топлива, а следовательно, и о сокращении финансовых затрат.

Системы рекуперации тепла

Энергия, получаемая в результате работы выхлопной системы двигателя, является дополнительным потенциальным энергетическим ресурсом на судне из-за достаточно высокой интенсивности и температуры образующегося теплового потока. Хорошо зарекомендовавшая себя концепция системы рекуперации тепла для морского судостроения состоит в том, чтобы направить выхлопной газ из основного двигателя в силовую турбину и/или в одно- или двухступенчатый парогенератор, который генерирует пар для паровой турбины. Силовая и паровая турбины приводят генератор в действие для выработки дополнительной электроэнергии.

Использование системы рекуперации тепла приводит к повышению энергетической эффективности судна при средних и высоких нагрузках на главный двигатель. В судостроении используются различные системные решения для рекуперации тепла, которые зависят от следующих факторов: мощности двигателя, энергопотребления, условий эксплуатации судна (соотношения нагрузок двигателя), свободного места в машинном отделении, требований к выбросам CO_2 , сроков окупаемости.

Как правило, система рекуперации тепла работает совместно с генератором, расположенным на одном валу с двигателем, и/или вспомогательными генераторными установками для удовлетворения больших потребностей в электроэнергии. Крупнейшие системы рекуперации тепла могут удовлетворить общую потребность выработки электроэнергии даже во время работы в качестве автономного источника энергии. Это потенциаль-

но позволит не использовать дополнительную вспомогательную дизель-генераторную установку (например, на этапе проектирования нового объекта), тем самым исключая затраты на монтаж и эксплуатацию.

Схематическое расположение системы рекуперации тепла показано на рис. 1, а соответствующий обзор различных конфигураций системы приведен ниже.

Силовая турбина – генератор (PT-G)

Силовая турбина является самой простой и дешевой системой рекуперации тепла. До 5% дополнительной мощности (относительно текущей нагрузки основного двигателя) может быть сгенерировано в зависимости от размера основного двигателя, его текущей нагрузки, а также расхода выхлопных газов через байпас турбокомпрессоров (до 12% общего расхода), тем самым приводя в действие силовую турбину, как показано в нижней левой части рис. 1. Обычно силовая турбина (СТ) работает в диапазоне от 50 до 100% своей мощности. Уменьшение эффективности турбокомпрессоров связано с отбором части выхлопных газов для силовой турбины. Но поскольку этот эффект довольно мал, он не рассматривается в модели. При нагрузке двигателя менее 50% от номинальной производительности (MCR) перепускной клапан выхлопных газов будет закрыт, в противном случае эффективность турбокомпрессоров будет низкой, и надежная работа системы не гарантируется. После силовой турбины расширенный выхлопной газ подмешивается к выхлопному газу на выходе из турбокомпрессора и направляется в окружающую среду через дымовую трубу. Силовая турбина подключена к генератору при помощи редуктора. Для удовлетворения потребностей судна в электроэнергии система рекуперации тепла включает в себя несколько дизель-генераторных установок. Минимальная потребность в электроэнергии может быть обеспечена исключительно системой PT-G. Когда потребность в энергии больше, система рекуперации тепла работает параллельно с одной или несколькими дизель-генераторными установками.

Паровая турбина – генератор (ST-G)

В схеме, где применяется паровая турбина с генератором, из выхлопных газов основного двигателя может быть получено до 8% дополнительной мощности (относительно текущей нагрузки основного двигателя). Система рекуперации тепла использует высокую температуру выхлопных газов, за счет чего генерируется пар в одно- или двухступенчатом парогенераторе-рекуператоре (HRSG), который обозначен на рис. 1 как “Экономайзер”. Полученный пар приводит в движение одно- или двухступенчатую турбину, которая в свою очередь вращает электрический генератор через редуктор для выработки дополнительной электроэнергии. По сравнению с установкой, где применяются совместно силовая и паровая турбины (см. следующий подраздел), темпе-

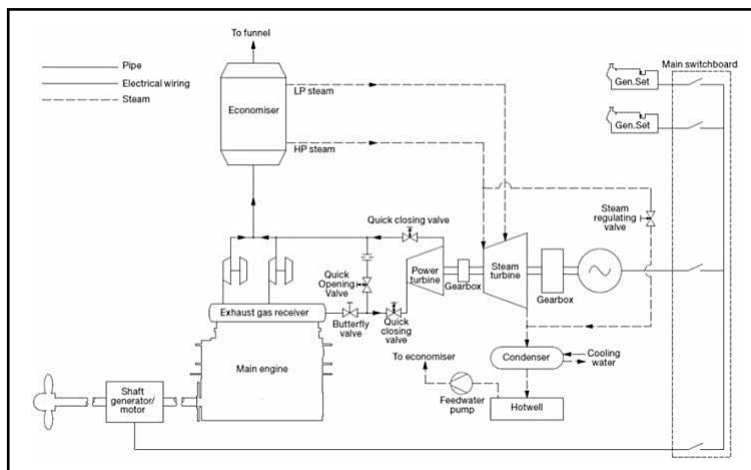


Рис. 1. Схематическое изображение системы рекуперации тепла

ратура отработавших газов на входе в парогенератор-рекуператор выше. Это связано с отсутствием силовой турбины, то есть здесь часть выхлопных газов из потока, проходящего через байпас турбокомпрессора, сразу смешиваются в выхлопной трубе на выходе из турбокомпрессоров (рис. 1). Повышение температуры выхлопных газов увеличит расход пара, поступающего на паровую турбину, и как следствие – мощность на ее валу.

Паровая турбина и силовая турбина – генератор (STPT-G)

Система, представленная на рис. 1, показывает совместную работу силовой и паровой турбины, она подходит для больших электрических нагрузок, например для использования в контейнеровозах с большим количеством рефрижераторов или в круизных судах с высокой гостевой нагрузкой. Данная схема может генерировать до 11% дополнительной мощности (относительно текущей нагрузки основного двигателя). Типовая схема работы системы STPT-G делится на два этапа. На первом этапе выхлопной газ после основного двигателя проходит через силовую турбину и турбокомпрессоры, которые работают параллельно. Затем потоки перемешиваются и на втором этапе поступают в парогенератор-рекуператор. Парогенератор-рекуператор может быть одно- или двухступенчатым, как и сама паровая турбина.

Как силовые, так и паровые турбины подключены к стандартному генератору с помощью различных редукторов. Паровая турбина включается при уровне нагрузки 35% от номинальной, тогда как силовая турбина запускается, когда нагрузка на основной двигатель достигает 50%, как описано выше. При низких и средних электрических нагрузках это решение способно покрыть общий объем электропотребления, что значительно снижает затраты на топливо.

Описание модулей

Назначением библиотеки Ship Energy Systems является моделирование бортовой энергосистемы. Рассмотрим коротко новые функции и компоненты, связанные с системами рекуперации тепла. На рис. 2 показана

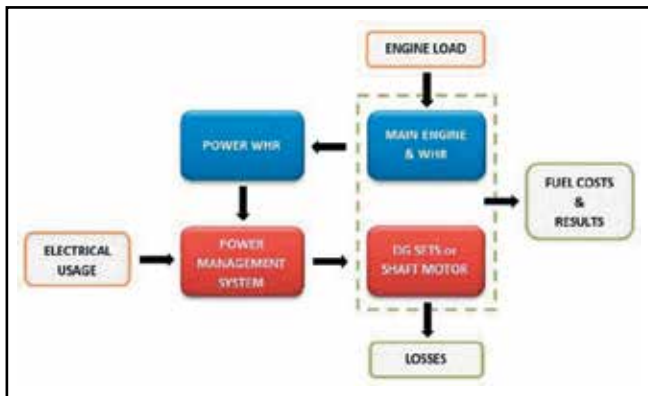


Рис. 2. Направления потоков данных для расчетов с системой рекуперации тепла

но направление расчета в рамках SES. Схема показывает, что моделирование начинается с блока потребления электроэнергии и заканчивается блоком получения данных о стоимости и объемах потребления топлива. Блок работы двигателя запускает расчет основных компонентов, необходимых для приведения системы в движение. Блок двигателя напрямую связан с блоком потока выхлопных газов, приводящих в действие систему рекуперации тепла для выработки энергии. Система управления питанием (PMS) рассчитывает разницу между мощностью, производимой системой рекуперации тепла, и электрическим приводом. Если результат будет положительным, PMS направит доступную дополнительную мощность на вал двигателя, чтобы поддержать тягу, в случае отрицательной разницы оставшаяся электрическая мощность должна генерироваться дизель-генераторными установками.

Подробное описание новых компонентов систем рекуперации тепла библиотеки корабельных энергетических систем приведено ниже. Для проверки нового функционала и результатов, получаемых в ходе моделирования, были проведены различные эксперименты.

Паровая турбина и энергетическая турбина – модуль генератора

Модули PT-G, ST-G и STPT-G были добавлены в библиотеку как полноценные компоненты. Они содержат подмодели силовой турбины, паровой турбины и генератора.

Модули PT-G и ST-G реализованы отдельно в библиотеке, но с технической точки зрения их можно получить, просто исключив либо силовую, либо паровую турбину модуля STPT-G.

Модуль STPT-G включает в себя математическую модель силовой турбины, паровой турбины и генератора. Паровая турбина может быть выбрана с одной или двумя степенями давления в зависимости от принятого типа парогенератора-рекуператора.

Для регулирования работы силовой турбины в компоненты STPT-G и PT-G был включен регулирующий клапан (разделитель). В случае нагрузки двигателя ниже 50% максимальной номинальной мощности (MCR) поток выхлопных газов по умолчанию обходит силовую турбину и напрямую добавляется к выхлопным газам после турбонагнетателя, а затем направляется обратно в окружающую среду через выпускную воронку или парогене-

ратор-рекуператор, если это предусмотрено. Стратегия управления может быть скорректирована в рамках параметров модели.

Модуль генератора пара теплоснабжения

Парогенератор с рекуперацией тепла является еще одним фундаментальным компонентом системы рекуперации тепла. Любое изменение его конструкции будет напрямую влиять на производительность паровой циркуляции и, следовательно, на производительность всей системы рекуперации. По существу, он состоит из теплообменника, в котором используется высокая температура выхлопных газов основного двигателя для производства пара, используемого для работы генератора с паровой турбиной. Производство пара может быть реализовано на нескольких уровнях давления, где каждый дополнительный уровень повышает эффективность работы компонента. В связи с доступной стоимостью парогенераторы-рекуператоры с одной или двумя степенями давления являются стандартом в судостроении, поэтому они были реализованы в библиотеке SES. Конденсатор, питательный насос и паровой барабан находятся в модуле парогенератора-рекуператора. Это позволяет моделировать систему рекуперации тепла, просто используя парогенератор-рекуператор и турбину с модулями генератора.

В компоненте парогенератора-рекуператора реализованы, по существу, термодинамические характеристики (рис. 3). На рисунке приведена типичная диаграмма рекуперации тепла для парогенератора-рекуператора с одной степенью давления, то есть отображение температуры в зависимости от теплопередачи для восходящего и нисходящего потоков. Для конструкции парогенератора-рекуператора область между верхней и нижней кривой играет основную роль: это визуализация характеристик теплообмена парогенератора. При идеальном теплообмене жидкости будут "приближаться" друг к другу либо с левой, либо с правой стороны диаграммы. Разница температур в левой части диаграммы указывает на энергию, остающуюся в выхлопных газах, тогда как разность температур в правой части отражает то, насколько хорошо пар мог поглощать тепло от выхлопных газов. Ограни-

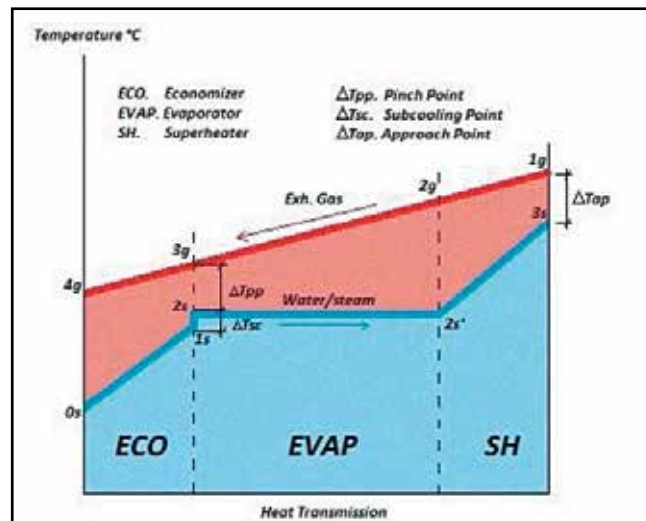


Рис. 3. Диаграмма теплопередачи для парогенератора-рекуператора при постоянном давлении

Табл. 1

Условия эксплуатации	Время		Силовая установка		Общая мощность (кВт)
	Ratio (%)	Часы (ч)	ME Load (%)	Power (кВт)	
Мореходный	35	2,604	90	41,202	3,000
Гружёный	15	1,116	65	29,757	2,000
Медленное движение	30	2,232	40	18,312	2,800
Маневрирование	5	372	25	11,445	3,500
Пребывание в порту	15	1,116	0	0	2,500

чивающим фактором эффективности теплообменника является стоимость материала: поскольку разность температур между жидкостями уменьшается, требуется значительно большая площадь теплообменника.

По аналогии с силовой турбиной в компоненты парогенератора-рекуператора был включен регулирующий клапан (разделитель) для регулирования работы паровой турбины. По умолчанию в случае нагрузки двигателя ниже 35% максимальной номинальной мощности (MCR) общий объем потока выхлопных газов обходит парогенератор-рекуператор, чтобы избежать образования пара, и затем направляется непосредственно в воронку. Настройки регулирующего клапана можно изменить, отрегулировав кривую характеристик клапана в модели.

Вал моторного модуля

В библиотеку включен компонент вала двигателя (SM), чтобы должным образом учесть случаи, когда система рекуперации тепла вырабатывает больше электроэнергии, чем требуется. При этом конечная нагрузка на основной двигатель представляет собой разность требуемой мощности основного двигателя для удовлетворения требования к скорости судна и мощности вала двигателя.

В принципе, валовый двигатель также может приводиться в движение дизельными двигателями и затем работать самостоятельно (в режиме ожидания или в порту) или вместе с основным двигателем для обслуживания пиковых нагрузок. Валовый двигатель может работать в обратном направлении, то есть как генератор вала, что потенциально позволяет избежать использования дизель-генераторов.

Результаты моделирования

Чтобы продемонстрировать функциональность нового пакета систем рекуперации тепла в библиотеке SES, было осуществлено моделирование двух из трех систем рекуперации тепла для различных реальных бортовых энергосистем и произведено сравнение их показателей с одним и тем же базовым сценарием без каких-либо систем рекуперации тепла. Основное внимание уделялось потенциальным преимуществам системы рекуперации с точки зрения расхода топлива и затрат.

В библиотеке SES также возможно моделировать контур охлаждения пресной и морской воды для главных и вспомогательных двигателей, а также вентилятор машинного отделения, обеспечивающий охлаждение и наддув воздуха из окружающей среды. Для целей симуляций, представленных в этой статье, эти системы реализованы в моделях не явно, но их влияние учитывается в режимах потребления электроэнергии, то есть в соответствии с требуемой электрической мощностью, необходимой для насосов и вентилятора.

На основе кривых удельного расхода топлива (SFOC) каждого двигателя компонент топливного бака контролирует расход топлива и рассчитывает затраты на топливо для различных систем рекуперации тепла. Это может быть использовано для расчета возврата инвестиций судовладельца и/или фрахтователя.

Рассмотрим ниже, как осуществляется преобразование энергии с помощью различных систем рекуперации тепла в большом контейнеровозе, работающем 310 дней в году между Гамбургом и Сингапуром. Судно оснащено большим двухтактным главным двигателем с максимальной номинальной мощностью 45,780 кВт, тремя дизельными генераторами мощностью 1500 кВт каждый для подачи электроэнергии. В основном двигателе используется мазут (HFO) по цене 430 долларов США за тонну, а в дизель-генераторах – дизельное топливо для судов (MDO) по цене 650 долларов США за тонну. Соответствующие рабочие условия приведены в табл. 1.

Большой контейнеровоз с STPT-G

В первом примере система рекуперации тепла рассматривается как ступень двойного давления парогенератора-рекуператора и STPT-G (рис. 4 и рис. 1). Это система рекуперации тепла способна восстановить большое количество энергии.

Результаты моделирования показывают, что во время медленного выпуска пара поток выхлопных газов основного двигателя обходит силовую турбину, но паровая турбина работает и вырабатывает электроэнергию. В случае морских условий и загруженности судна потребность в электрической энергии полностью покрывается системой рекуперации тепла, а дополнительная генерируемая мощность используется через валовый двигатель для поддержания движителя, уменьшая нагрузку двигателя, необходимую для удов-

Табл. 2

	HFO (т/год)	HFO (\$/год)	MDO (т/год)	MDO (\$/год)
Без рекуперации	31,884	13,710,172	5,100	3,315,078
STPT-G	31,088	13,367,857	1,718	1,117,116
Экономия	796	342,315	3,382	2,197,962

летворения требований движителя. Это обеспечивает дополнительную экономию топлива основного двигателя. При маневрировании и пребывании судна в порту показатели системы с STPT-G-рекуперацией и без нее не отличаются друг от друга.

Для морских условий диаграмма Сэнки, показанная на рис. 5, отображает преобразование энергии во всей бортовой энергетической системе, включая энергию, регенерированную с помощью STPT-G-системы реку-

перации тепла. Только приблизительно 50% энергии топлива (слева на рисунке) в конечном итоге превращаются в движение, оставшаяся энергия возвращается в виде тепла в окружающую среду либо через систему охлаждения (20,5%), либо через систему выхлопных газов (29,0%).

В системе STPT-G рекуперации тепла одна часть тепловой энергии отработавших газов непосредственно рекуперирована силовой турбиной в механическую энергию (примерно 4,9% по отношению к нагрузке основного двигателя, то есть 2,0 МВт/41,2 МВт), а другая часть питает паровую турбину с двумя степенями давления (то есть 2,6 МВт/41,2 МВт = 6,3%), обеспечивающую общую выработку электроэнергии системы рекуперации тепла в 10,4% по отношению к нагрузке на основной двигатель (и 5,35% по отношению к первоначальной энергии топлива). В морских условиях общая рекуперированная энергия выше, чем электрическая потребность, таким образом, 3,2% электрической энергии дополнительно используется через валовый двигатель для поддержки движителя, что в целом обеспечивает эффективность основного двигателя около 55%.

Табл. 2 показывает общее потребление топлива HFO для основного двигателя и MDO для вспомогательных двигателей, вместе с соответствующей экономией. Из таблицы видно, что ежегодная экономия составляет более 2,5 млн долларов с учетом вышеуказанных затрат на топливо. Инвестиционные затраты на систему рекуперации тепла STPT-G надлежащего размера для рассматриваемого контейнеровоза оцениваются примерно в 10 млн долларов. Эти инвестиции включают в себя затраты на паровую турбину, силовую турбину, валовый двигатель, парогенератор-рекуператор с двумя степенями давления, систему управления питанием, рекуперативный теплообменник и затраты на установку. Таким образом, в этом случае возврат инвестиций происходит примерно через 4 года.

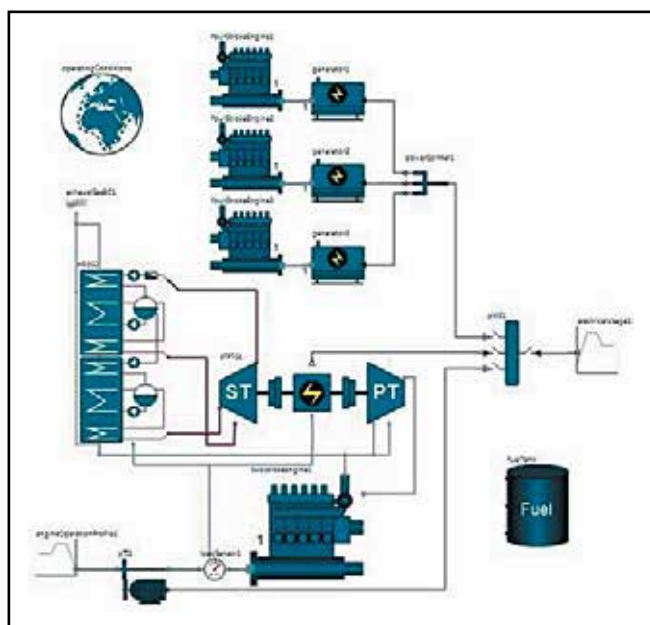


Рис. 4. Имитационная модель STPT-G

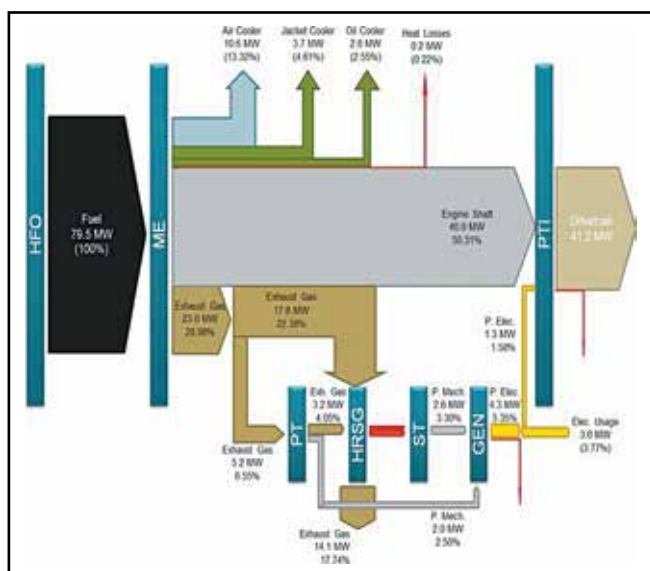


Рис. 5. Диаграмма Санки для морских условий

Большой контейнеровоз с PT-G

Во втором примере рассматривается система PT-G-рекуперации тепла (рис. 6). Это решение обычно способно восстанавливать лишь небольшое количество энергии. Для данного примера применяются те же данные о судне, профиле и условиях эксплуатации, что и в отношении рекуператора STPT-G, только система рекуперации тепла была заменена.

Результаты моделирования показывают, что при медленном выпуске пара поток выхлопных газов основного двигателя обходит силовую турбину. В случае морских

и балластных условий потребность в электричестве частично покрывается системой рекуперации тепла, что приводит к снижению потребления MDO. Системы рекуперации тепла никогда не работают в точке, где вырабатывается дополнительная электрическая мощность для вала двигателя, таким образом, топливо основного двигателя не сохраняется. При маневрировании и пребывании в порту показатели системы с PT-G-рекуперацией и без нее не отличаются друг от друга, как и в предыдущем случае.

Ежегодная экономия MDO составляет примерно 2400 тонн, что соответствует 1,5 миллиону долларов, исходя из вышеуказанной цены на дизельное топливо. Принимая во внимание общие инвестиционные затраты в 5 млн долларов на систему рекуперации отработанного тепла PT-G, окупаемость инвестиций в этом случае достигается примерно через 3,5 года.

Выводы

Результаты энергомоделирования для расчета систем рекуперации тепла с применением расширенной библиотеки Ship Energy Systems в программном обеспечении SimulationX показывают высокий потенциал для значительной экономии в сравнении с системой рекуперации тепла с правильными размерами и базовым вариантом без рекуперации тепла. При этом следует учитывать, что наиболее подходящая система рекуперации тепла должна быть выбрана в соответствии с основными данными судна, режимом работы, требованиями к силовой установке, потребностью в электрической энергии, а также предполагаемым сроком окупаемости для владельца судна. Инвестирование в более конкурентоспособные и эффективные суда, как правило, включает в себя некоторые первоначальные вложения, но, по существу, приводит к сокращению эксплуатационных расходов в течение всего срока

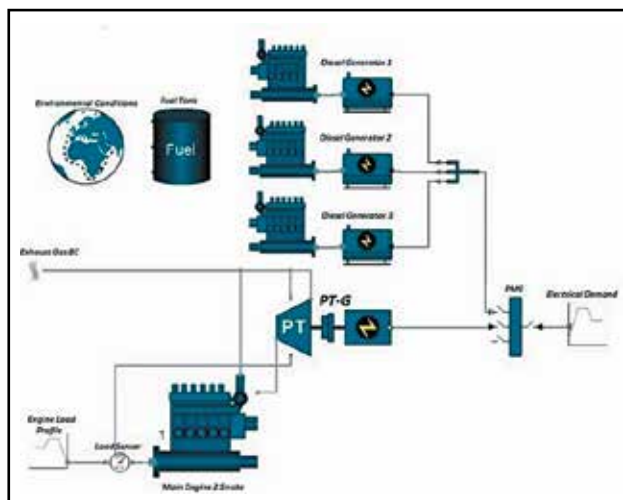


Рис. 6. Имитационная модель PT-G

эксплуатации. В частности, внедрение системы рекуперации тепла связано с большими первоначальными инвестициями, рассчитанными на довольно короткий срок окупаемости.

Функциональность библиотеки систем рекуперации тепла может быть использована либо на ранней стадии проектирования новых судов, либо – в случае модернизации – для повышения энергоэффективности. В обоих вариантах оценивается потенциал системы рекуперации тепла и определяется подходящий размер соответствующих компонентов.

В перспективе в будущем разработки библиотеки судовых энергетических систем планируется включить аккумуляторные и гибридные системы, а также средства мониторинга наиболее распространенных выбросов в атмосферу.

**Алессандро Джиннетти, Йорг Лампе, DNV GL SE,
Алекс Магданз, IPI GmbH, Германия**

НОВОСТИ

СПБГМТУ и консорциум “РазВИТие” – соглашение о подготовке инженерных кадров

В ноябре в рамках форума “РазВИТие. Российские технологии для инженеров” Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (СПБГМТУ) и консорциум отечественных ИТ-разработчиков “РазВИТие” подписали соглашение о стратегическом партнерстве в сфере подготовки инженерных кадров. Университет получит доступ к современным ИТ-инструментам для организации новых направлений обучения, а консорциум – центр компетенций, который будет способствовать адаптации продуктов PLM-комплекса под задачи циф-

рового производства судостроительных предприятий. Сотрудничество СПБГМТУ и компаний, составляющих консорциум, развивается в течение многих лет. Системы от компании АСКОН широко используются в учебных программах университета. Знакомство СПБГМТУ с системой автоматизированного проектирования КОМПАС-3D произошло в 2000 году, с САПР ТП ВЕРТИКАЛЬ – в 2007, с системой управления инженерными данными об изделии ЛОЦМАН:PLM – в 2017 году. “Сегодня существуют серьезные отечественные

цифровые решения для машиностроения, для судостроения таких решений пока нет: принципы судостроительного проектирования значительно отличаются от принципов проектирования в машиностроении. В условиях обсуждения на высшем уровне вопросов импортозамещения, реализации университетом проекта “Цифровая верфь”, роста уровня продуктов консорциума заключение этого соглашения – естественный шаг для дальнейшего развития сотрудничества. Для того чтобы заниматься цифровой трансформацией судостроительного производства, нуж-

но знать и процессы, и цифровые технологии. Сейчас подготовка по этому направлению не ведется ни в одном вузе страны. В следующем году университет откроет набор на новый, крайне полезный для отрасли курс – “Цифровой инжиниринг в судостроении”. Программа курса подразумевает не только изучение продуктов консорциума, но и разработку приложений на их основе”, – сказал директор института информационных технологий и заведующий кафедрой вычислительной техники и информационных технологий СПБГМТУ Алексей Липис.