

УДК 621.577

А.А. СИРОТА

*Николаевский государственный гуманитарный университет им. Петра Могилы,
Украина*

ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ТРИГЕНЕРАЦИОННЫХ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК С ВОДОРОДНЫМИ ТОПЛИВНЫМИ ДОБАВКАМИ

Проанализирована эффективность совместного применения в дизелях систем тригенерации и добавок водорода к топливу. Определены рациональные параметры таких комбинированных систем, обеспечивающие максимальное повышение эффективности дизелей.

тригенерация, утилизация теплоты, холод, топливо, водородные добавки

Анализ проблемы и постановка цели исследования

Тригенерационные установки судовых ДВС используют вторичные энергоресурсы (ВЭР) двигателей (теплоту уходящих газов, наддувочного воздуха, охлаждающей воды) для производства холода в дополнение к механической или (и) электрической энергии и теплоте. Трансформация теплоты в холод осуществляется в теплоиспользующих холодильных машинах (ТХМ). В свою очередь, выработанный в ТХМ холод целесообразно применять для снижения температуры циклового воздуха дизелей (наружного воздуха на входе, наддувочного воздуха), то есть для собственных потребностей СЭУ. Это позволило бы сократить удельное потребление топлива, повысить КПД и мощность двигателей. Так, известно, что каждые 10 °С увеличения температуры наружного воздуха на входе обеспечивают повышение мощности на 5...7% и КПД на 0,5...0,7% [1].

Однако при работе судовых ДВС на частичных нагрузках температура их ВЭР снижается, что сокращает эффективность применения систем утилизации вообще и тригенерации в частности. Поэтому целесообразным является их использование в комбинации с другими методами повышения эффективности двигателей, в частности, путем применения альтернативных топлив. К последним относится и

водород, который можно использовать в дизелях в виде небольших добавок к органическому топливу. Малые, не превышающие 1...2 %, доли водородных добавок не создают проблем, связанных с получением и хранением водорода на борту судна. В то же время подача в цилиндры двигателей наряду с основным топливом небольших добавок водорода позволяет повысить их эксплуатационную эффективность и экологическую безопасность. Это достигается благодаря способности водорода интенсифицировать сгорание углеводородных топлив и воздействовать на термодинамическую эффективность рабочего цикла двигателей.

Целью выполненного исследования является анализ эффективности совместного применения тригенерационных систем охлаждения циклового воздуха судовых дизелей и небольших добавок водорода к основному топливу, определение на основе результатов этого анализа рациональных режимов работы таких комбинированных систем.

Анализ эффективности применения в ДВС тригенерации и водородных добавок к топливу и определение рациональных их параметров

Наиболее распространенными типами ТХМ являются абсорбционные и эжекторные холодильные машины. Однако абсорбционным машинам прису-

щи повышенные габариты (соответственно и аэродинамическое сопротивление). Поэтому целесообразность их включения в газовый и воздушный тракты ДВС весьма проблематична. Эжекторные машины отличаются конструктивной простотой и надежностью в эксплуатации, поскольку единственным их устройством с подвижными элементами является насос, а функцию компрессора в них выполняет струйный аппарат – эжектор [2]. Применение в эжекторных ТХМ низкокипящих рабочих тел (НРТ) позволяет утилизировать теплоту ВЭР низкого температурного уровня. Включение таких ТХМ в состав ДВС не приводит к заметному усложнению установки.

Схема эжекторной ТХМ, использующей теплоту уходящих газов и наддувочного воздуха для предварительного охлаждения наружного воздуха на входе ДВС и промежуточного охлаждения наддувочного воздуха, представлена на рис. 1. Эжекторная ТХМ состоит из паросилового и холодильного контуров. Паросиловый контур служит для получения паров НРТ высокого давления, энергия которых используется в эжекторе для поджатия паров НРТ низкого давления, всасываемых из испарителей (воздухоохладителей) холодильного контура, до давления в конденсаторе. Жидкий НРТ после конденсатора разделяют на два потока. Первый поток подают насосом в генератор, в экономайзерной секции которого жидкость нагревается с отводом теплоты от наддувочного воздуха, а в испарительной – испаряется при высоком давлении за счет теплоты, отводимой от уходящих газов ДВС.

Второй поток дросселируют в дроссельном клапане и направляют в испаритель, где жидкость испаряется при низком давлении и соответственно температуре, отводя теплоту в одной секции от наружного воздуха на входе ДВС, а в другой – от наддувочного воздуха, уже охлажденного в экономайзерной секции генератора. Пары НРТ всасываются из испарителей эжектором и подаются

снова в конденсатор. Эжектор совмещает функции детандера паросилового контура (расширение пара происходит в его сопле) и компрессора холодильного контура (повышение давления пара, всасываемого из испарителей происходит в камере смешения и диффузоре).

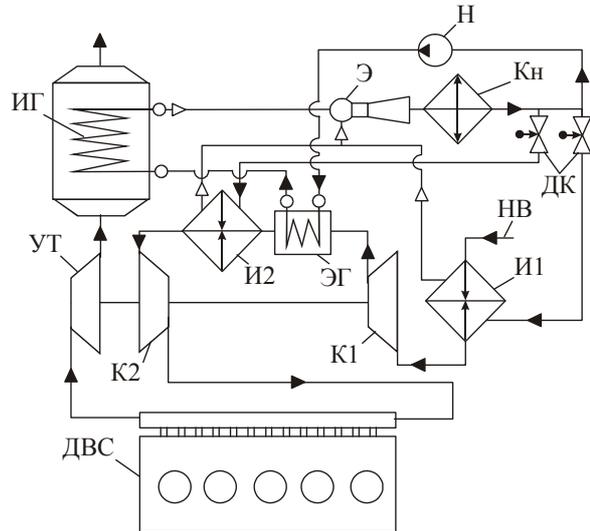


Рис. 1. Схема тригенерационной дизельной установки на базе эжекторной ТХМ, использующей теплоту уходящих газов и наддувочного воздуха для предварительного и промежуточного охлаждения воздуха: ЭГ, ИГ – экономайзерная и испарительная секции генератора паров НРТ; Э – эжектор; Кн – конденсатор; Н – насос; ДК – дроссельный клапан; НВ – наружный воздух; И1 и И2 – испарители (воздухоохладители); К1, К2 – компрессоры первой и второй ступеней; УТ – утилизационная турбина; УК – утилизационный котел

Эффективность ТХМ оценивается тепловым коэффициентом $\zeta = Q_0 / Q_r$, который представляет собой отношение холодопроизводительности Q_0 (количества теплоты, отведенной от циклового воздуха двигателя) к количеству теплоты Q_r , подведенной в генераторе к кипящему НРТ от уходящих газов (возможно еще и от наддувочного воздуха). Тепловой коэффициент ζ возрастает с повышением температуры кипения в генераторе (испарителе НРТ высокого давления) t_r и испарителе НРТ низкого давления (воздухоохладителе) t_0 и с уменьшением температуры конденсации t_k [2].

Результаты анализа эффективности применения тригенерации на основе эжекторных ТХМ в среднеоборотных судовых ДВС приведены на рис. 2 в виде зависимости удельных, приходящихся на единичный расход газа (воздуха), тепловых нагрузок на генератор $\bar{q}_Г$ и испаритель (удельной холодопроизводительности) \bar{q}_0 , тепловых коэффициентов ТХМ ζ , снижения температуры Δt_b воздуха на

входе ДВС от температуры кипения НРТ в генераторе t_r при температурах кипения НРТ в испарителе $t_0 = 0^\circ\text{C}$; конденсации $t_k = 35^\circ\text{C}$; уходящих газов перед генератором $t_{r1} = 350^\circ\text{C}$ и ограничении температуры уходящих газов после генератора в целом (включая экономайзерную секцию) значением $t_{r2} = 160^\circ\text{C}$, исключающим опасность возникновения сернистой коррозии.

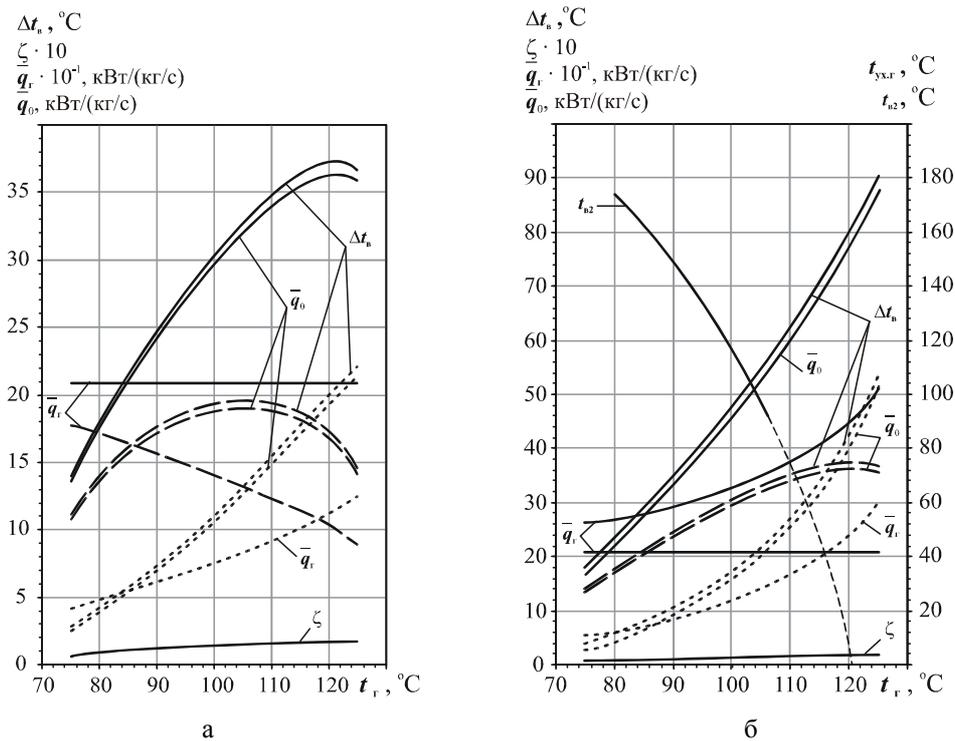


Рис. 2. Удельные тепловые нагрузки на генератор $\bar{q}_Г$ и испаритель \bar{q}_0 , тепловые коэффициенты ТХМ ζ , снижение температуры Δt_b воздуха на входе ДВС, температура t_{b2} наддувочного воздуха после экономайзерной секции генератора (вне газохода), температура $t_{yx.g}$ уходящих газов после испарительной секции генератора ТХМ в зависимости от температуры кипения НРТ в генераторе t_r при температурах уходящих газов перед генератором $t_{r1} = 350^\circ\text{C}$ и после генератора $t_{r2} = 160^\circ\text{C}$; кипения в испарителе $t_0 = 0^\circ\text{C}$ и конденсации $t_k = 35^\circ\text{C}$:
 — — за счет отвода теплоты генератором в целом \bar{q}_0 , $\bar{q}_Г$; - - - испарительной секцией \bar{q}_0 , $\bar{q}_Г$;
 — экономайзерной секцией \bar{q}_0 , $\bar{q}_Г$; а — экономайзер в газоходе;
 б — экономайзер вынесен из газохода

Здесь же нанесены значения температуры t_{b2} наддувочного воздуха после экономайзерной секции генератора в случае ее вынесения из газохода ДВС на линию наддувочного воздуха при его температуре перед экономайзером $t_{b1} = 220^\circ\text{C}$. При размещении экономайзера вне газохода температу-

ра уходящих газов после испарительной секции генератора ограничивалась значением $t_{r,i2} = 160^\circ\text{C}$. В качестве НРТ в ТХМ применен озонобезопасный хладон R142b.

Величина $t_{yx.g}$ на рис. 2, а соответствует температуре уходящих газов после испарительной секции

генератора при размещении его экономайзерной секции в газоходе.

Как видно, с повышением t_r от 80 до 120 °С значение температуры газов после испарительной секции $t_{yx,r} = t_{r,и2}$ изменяется от 200 до 260 °С, что свидетельствует о том, что из-за ограничения $t_{r2} = 160$ °С в испарительной секции генератора не срабатывает тот теплоперепад, который соответствует минимальной (обусловленной интенсивностью теплопередачи) разности температур между $t_{yx,r}$ и t_r ($\Delta t_{r/a} = t_{yx,r} - t_r = 20$ °С) на ее выходе. То обстоятельство, что с повышением t_r разность температур $\Delta t_{r/a}$ даже несколько увеличивается ($\Delta t_{r/a} = 120 \dots 140$ °С), обусловлено сокращением удельной теплоты фазового перехода НРТ в испарительной секции большими темпами (с приближением к тройной точке) по сравнению с монотонным возрастанием затрат теплоты на нагрев конденсата НРТ от t_k до t_r , т.е. изменением соотношения удельных нагрузок на испарительную и экономайзерную секции в пользу последней. В случае вынесения экономайзера на линию наддувочного воздуха (при ограничении по температуре уходящих газов, но уже после испарительной секции: $t_{r,и2} = 160$ °С) разность температур $\Delta t_{r/a}$ сокращается от 80 до 40 °С, т.е. на величину приращения t_r от 80 до 120 °С.

Наличие ограничения по температуре уходящих газов после генератора $t_{r2} = 160$ °С, а при вынесении экономайзера из газохода – по температуре газов после испарительной секции $t_{r,и2} = 160$ °С тождественно постоянству удельных тепловых нагрузок на генератор \bar{q}_r и его испарительную секцию \bar{q}_r'' соответственно: графики зависимостей $\bar{q}_r = f(t_r)$ на рис. 2, а и $\bar{q}_r'' = f(t_r)$ на рис. 2, б представляют собой горизонтальные прямые. Возрастание же суммарной удельной холодопроизводительности \bar{q}_0 в первом случае и ее части \bar{q}_0'' , приходящейся на испарительную секцию, происходит исключительно

благодаря увеличению теплового коэффициента ζ с повышением t_r .

Таким образом, именно ограничение температуры уходящих газов после генератора $t_{r2} = 160$ °С приводит к значительному сокращению теплоперепада по уходящим газам $\Delta t_{r,и} = t_{r1} - t_{r,и2}$, срабатываемого в испарительной секции генератора, с повышением t_r : от 150 °С при $t_r = 80$ °С до 90 °С при $t_r = 120$ °С, что в конечном счете ограничивает общую удельную холодопроизводительность ТХМ \bar{q}_0 и соответственно Δt_b их максимальными значениями при $t_r = 120$ °С (рис. 2, а).

При вынесении экономайзера из газохода ограничение по температуре уходящих газов $t_{r,и2} = 160$ °С, обусловленное опасностью возникновения сернистой коррозии, хотя количественно и остается прежним, но его влияние на эффективность тригенерации качественно меняется: оно вызывает стагнацию тепловой нагрузки на испарительную секцию $\bar{q}_r'' = \text{const}$, не влияя на тепловую нагрузку экономайзерной секции \bar{q}_r' , увеличение которой с повышением t_r приводит к непрерывному возрастанию суммарной тепловой нагрузки генератора \bar{q}_r и, следовательно, удельной холодопроизводительности \bar{q}_0 и степени охлаждения воздуха в испарителе ТХМ Δt_b (рис. 2, б).

В обоих случаях максимальные \bar{q}_0 и соответственно Δt_b достигаются после $\bar{q}_0' > \bar{q}_0''$.

При вынесении экономайзера генератора ТХМ на линию наддувочного воздуха температура кипения t_r в испарительной секции должна быть около 110 °С, чтобы температура наддувочного воздуха была не ниже $t_{b2} = 60$ °С в соответствии с рис. 2, б. Отметим, что ее нижний предел определяется соотношением $t_{b2} = t_k + 15 \dots 20$ °С и зависит от интенсивности теплопередачи в конденсаторе. При этом степень охлаждения воздуха в испарителе Δt_b ока-

зывается более чем на 10 °С меньше от таковой при $t_r = 120$ °С, что приводит к снижению относительно приращения мощности и КПД почти на 10 % и 1 % соответственно. Чтобы получить максимальный эффект (при $t_r = 120$ °С) температура наддувочного воздуха на входе экономайзера $t_{в1}$ должна быть тоже выше примерно на 10 °С (по сравнению с принятой в расчетах $t_{в1} = 120$ °С).

Как видно из рис. 3, даже при столь жестком, обусловленном опасностью возникновения серни-

стой коррозии, ограничении по температуре уходящих газов $t_{r2} = 160$ °С применение ТХМ для охлаждения циклового воздуха ДВС обеспечивает весьма существенные относительное приращение мощности $\bar{N} \approx 18$ % и приращение КПД двигателя $\bar{\eta} = 1,8$ %. При вынесении экономайзерной секции генератора ТХМ из газохода на линию наддувочного воздуха эффект оказывается гораздо выше: $\bar{N} = 30...40$ % и $\bar{\eta} = 3...4$ %.

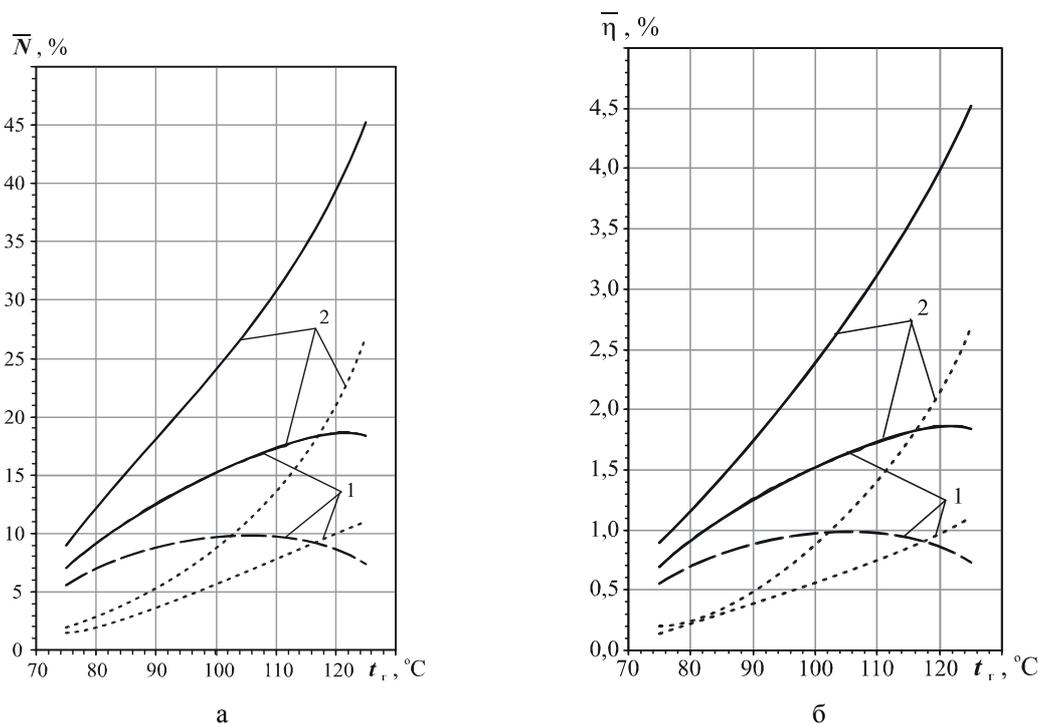


Рис. 3. Относительные приращения мощности \bar{N} (а) и КПД $\bar{\eta}$ (б) за счет уменьшения температуры воздуха на входе в зависимости от температуры t_r кипения НРТ в генераторе при температурах кипения в испарителе $t_0 = 0$ °С, конденсации $t_k = 35$ °С и уходящих газов после генератора $t_{r2} = 160$ °С:

— — за счет отвода теплоты генератором в целом \bar{N} , $\bar{\eta}$; - - - - испарительной секцией \bar{N} , $\bar{\eta}$;
 — экономайзерной секцией \bar{N} , $\bar{\eta}$; 1 — экономайзер в газоходе;
 2 — экономайзер вынесен из газохода

В результате выполненного автором экспериментального исследования влияния водородных добавок к органическому топливу на КПД четырехтактного среднеоборотного ДВС с наддувом были определены оптимальные массовые доли водородных добавок, обеспечивающие максимальное приращение КПД двигателя (на 2...4 %) и составляющие примерно 0,1 %.

Результаты расчетов приращения КПД среднеоборотных ДВС за счет предварительного и промежуточного охлаждения воздуха в эжекторной ТХМ совместно с применением водородных добавок (с массовой долей около 0,1 %) при разных ограничениях по температуре уходящих газов после генератора t_{r2} ($t_{r2} = 100$ °С и $t_{r2} = 160$ °С) представлены на рис. 4.

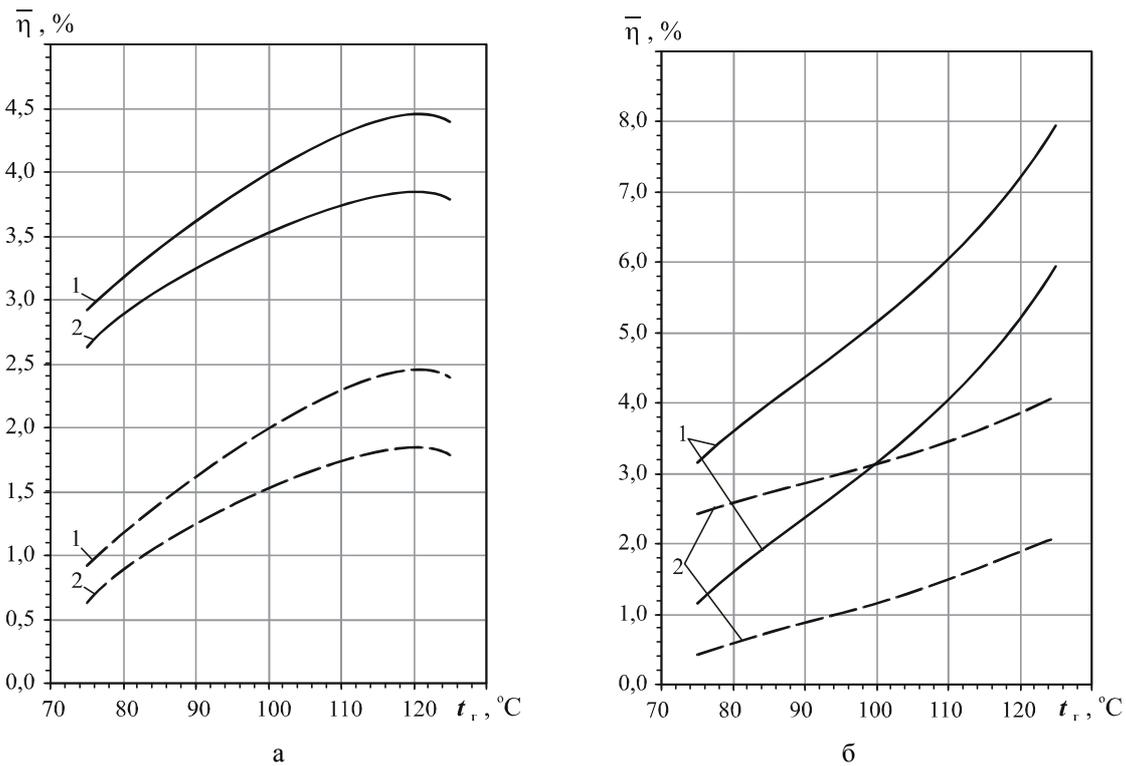


Рис. 4. Приращение КПД $\bar{\eta}$ в зависимости от температуры t_r кипения НРТ в генераторе при температурах уходящих газов перед генератором $t_{r1} = 350$ °С, кипения в испарителе $t_0 = 0$ °С, конденсации $t_k = 35$ °С и уходящих газов после генератора t_{r2} : 1 – $t_{r2} = 100$ °С; 2 – $t_{r2} = 160$ °С; --- – тригенерация; — – тригенерация и водородные топливные добавки; а – экономайзер в газоходе; б – экономайзер вынесен из газохода

Выводы

При жестком ограничении по температуре уходящих газов после генератора ТХМ ($t_{r2} = 160$ °С) приращение КПД ДВС за счет совместного применения тригенерации и водородных топливных добавок составляет 4...5%, а при менее жестком ($t_{r2} = 100$ °С) – 4,5...7,0%.

Большие значения в указанных диапазонах относятся к варианту с вынесением экономайзера генератора из газохода на линию наддувочного воздуха, а меньшие – когда экономайзер размещен в газоходе. При этом рациональное значение температуры кипения НРТ в генераторе составляет 120 °С.

Литература

1. Аболешкин С.Е., Балыхин Ю.В. Экспериментальная проверка стабильности интегрального показателя технического состояния главного судового двигателя // Судовые энергетические установки: Научн.-техн. сб. – Одесса: ОНМА, 2004. – Вып. 11. – С. 132-139.
2. Захаров В.Ю. Судовые установки кондиционирования воздуха и холодильные машины. – С.-Пб.: Судостроение, 1994. – 504 с.

Поступила в редакцию 1.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Капустин, Севастопольский национальный технический университет, Севастополь.