

УДК 621.431.3

М. Р. ТКАЧ, Б. Г. ТИМОШЕВСКИЙ, С. М. ДОЦЕНКО, Ю. Н. ГАЛЫНКИН

*Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина***УДЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ МЕТАЛЛОГИДРИДНЫХ УТИЛИЗАЦИОННЫХ УСТАНОВОК НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ**

*Для уточнения расчета водородной расширительной машины в широком диапазоне давлений, при определении удельной мощности металлгидридных утилизационных установок непрерывного действия, предложено использовать коэффициент неидеальности, который представляет собой отношение теплоперепада (водород рассматривается как идеальный газ), к теплоперепаду (водород рассматривается как реальный газ). Максимальное значение удельной мощности утилизационной металлгидридной установки непрерывного действия, работающей на температурном режиме малооборотного ДВС при  $P_{\max}=15\text{ МПа}$ ,  $P_{\min}=0,5\text{ МПа}$ ,  $T_0=500\text{ К}$  составляет 4,1 МВт/(кг/с)*

**Ключевые слова:** Водород, металлгидрид, утилизация, теплоперепад, мощность.

**Постановка проблемы.** Одним из эффективных способов утилизации тепла малооборотных ДВС, с целью выработки дополнительной механической или электрической мощности, является использование утилизационных металлгидридных установок непрерывного действия. Неотъемлемой составляющей таких установок является водородная расширительная машина (РМ). Очевидно, что использование РМ потребует решения проблем связанных с герметичностью установки и водородной коррозией, тем не менее, в мировой практике водородные РМ машины используются для ожижения водорода, очистки водородсодержащего газа и в составе специализированных энергетических установок [1].

Рабочим телом утилизационной металлгидридной установки непрерывного действия является гидридная суспензия, состоящая из металлгидридного материала, погруженного в инертную к реакции поглотителя выделения жидкость. Именно применение гидридных суспензий позволяет отказаться от циклических схем и обеспечить непрерывный рабочий цикл [2].

Для создания гидридных суспензий, можно использовать различные гидридообразующие материалы. Основными термодинамическими параметрами таких материалов являются удельная энтальпия гидридообразования  $\Delta H$  и удельная энтропия гидридообразования  $\Delta S$ . Вместо удельной энтропии гидридообразования  $\Delta S$  в гидридной технологии часто используют эквивалентный параметр – температура при давлении 1 атмосфера (0,1 МПа) –  $T^*$ . Указанные термодинамические параметры связаны между собой уравнением Вант-Гоффа:

$$\ln P = \frac{\Delta H}{RT} + \frac{\Delta S}{R}.$$

В рамках данного исследования рассматривался ряд металлгидридных материалов с удельной энтальпией гидридообразования

$$\Delta H = 0..40 \text{ МДж/(моль } H_2) \text{ и } T^* = 270..320 \text{ К [3, 4].}$$

При максимальной температуре десорбции  $T_d=500\text{ К}$  и температуре охлаждающего теплоносителя  $T_{охл}=300\text{ К}$ , в зависимости от вида используемого металлгидридного материала, давление десорбции может достигать 150 МПа, а адсорбцию водорода можно производить при давлении 0,1 МПа.

При определении располагаемого теплоперепада в расширительных машинах, рабочее тело, как правило, рассматривается как идеальный газ. При этом теплоперепад (водород рассматривается как идеальный газ), определен по следующим зависимостям:

$$\Delta H_{IG} = C_p T_2 (1 - (p_2/p_3)^{-m}), \quad \ln m = (k-1)/k,$$

$$C_p = 14300 \text{ Дж/(кг К)}, \quad k = 1,667 \text{ [5].}$$

В отечественной и зарубежной литературе не удалось обнаружить количественное влияние реальных свойств водорода на эффективность РМ. Однако такой подход для водородных РМ может содержать в себе существенную неточность из-за значительного отличия свойств водорода от свойств идеального газа рассматриваемой области параметров, рис. 1 [9].

Для учета реальных свойств водорода, используется **коэффициент неидеальности**, который представляет собой отношение теплоперепадов при расширении водорода рассматриваемого как реальный газ и как идеальный.

$$K_{\text{neid}} = \Delta H_{H_2} / \Delta H_{IG}.$$

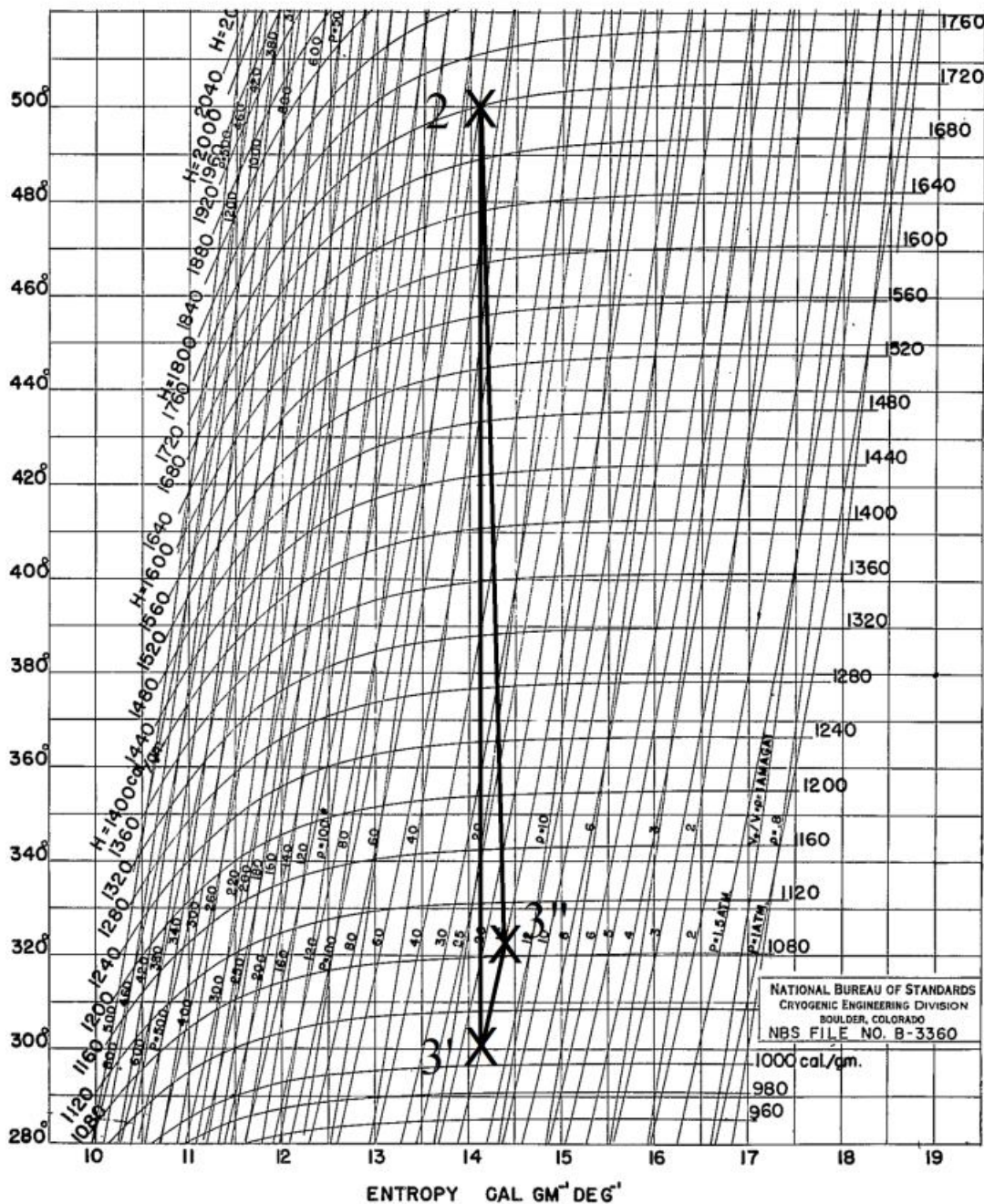


Рис. 1. T-S – диаграмма водорода [9]

Тогда реальный теплоперепад определяется по зависимости

$$\Delta H_{IG} = (C_p T_2 (1 - (p_2/p_3)^{-m})) K_{neid}.$$

Для определения теплоперепада (водород рассматривается как реальный газ), определялись давление  $P_2$  и температура  $T_2$  водорода на входе в РМ, удельная энтальпия и энтропия водорода при давлении  $P_2$  и температуре  $T_2$ , рис. 1 и 2

$$P_2 = P_d v_2,$$

где  $P_d$  – давление десорбции,  $v_2$  – коэффициент восстановления полного давления в перегревателе водорода.

При этом свойства водорода определены по зависимостям, предлагаемым [6, 7].

В свою очередь, давление десорбции  $P_d$  определяется температурой десорбции и видом металлгидридного материала:

$$\ln P_d = \frac{\Delta H}{RT_d} + \frac{\Delta S}{R}.$$

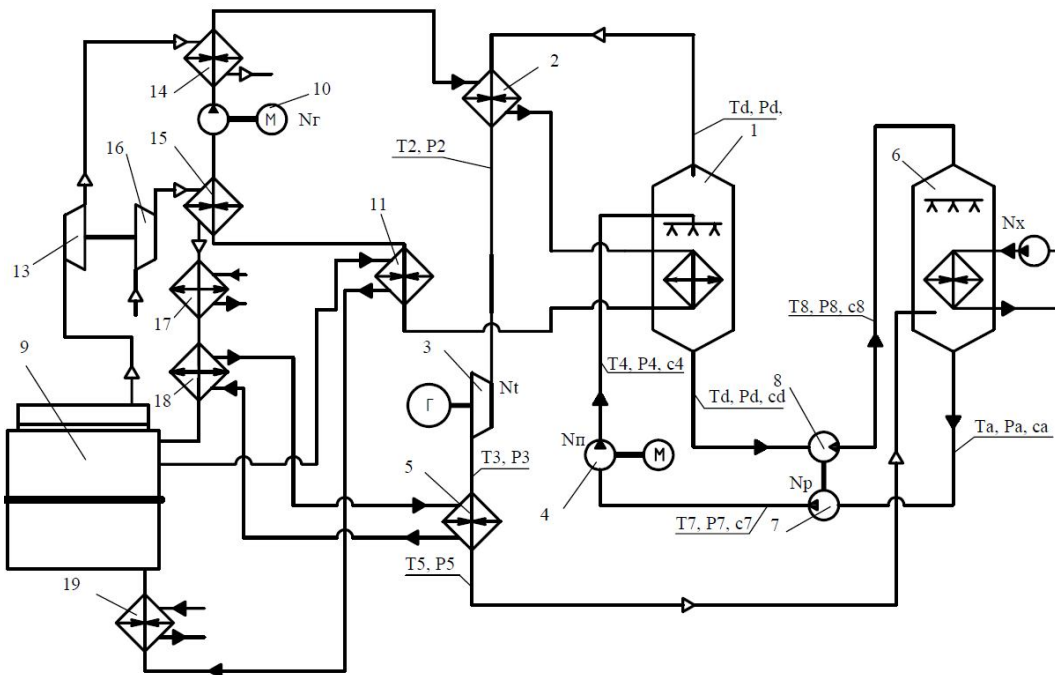


Рис. 2. Технологическая схема утилизации тепла ДВС

Температура водорода перед РМ  $T_2$  на ряде режимов может быть увеличена в перегревателе водорода:

$$T_2 = T_{1Г} - \Delta T_{\text{ПЕР}},$$

где  $T_{1Г}$  – температура горячего теплоносителя на входе в перегреватель водорода,  $\Delta T_{\text{ПЕР}}$  – температурный напор в перегревателе водорода.

Температура горячего теплоносителя на входе в перегреватель водорода  $T_{1Г}$  зависит от температуры выхлопных газов  $T_{\text{ВГ}}$ :

$$T_{1Г} = T_{\text{ВГ}} - \Delta T_{\text{УК}},$$

где  $\Delta T_{\text{УК}}$  – температурный напор в утилизационном котле.

Давление  $P_3$  определено по зависимости

$$P_3 = \frac{P_a}{v_3},$$

где  $P_a$  – давление адсорбции,  $v_3$  – коэффициент восстановления полного давления в тракте.

Температура  $T_3$  определена, исходя из условий изэнтропийности  $S_2^{H_2} = S_3^{H_3}$ . Отличие изэнтропийного и реального процессов расширения учитывается путем ввода внутреннего КПД  $\eta_0$ .

Температурный перепад с учетом реальных свойств водорода  $\Delta H_2$  определен как разность энтальпии водорода на входе  $H_2^{H_2}$  в РМ и на выходе из РМ  $H_3^{H_2}$ :

$$\Delta H_{H_2} = (H_2^{H_2} f(P_2, T_2) - H_3^{H_3} f(P_3, S_2)) \eta_0.$$

В диапазоне давлений водорода на входе в РМ  $P_2$  и давлений водорода на выходе из РМ  $P_3$  при температуре водорода  $T_2$  значение коэффициента неидеальности составляет 0,75...0,86, рис. 3.

В рассматриваемом диапазоне давлений, изменение температуры водорода на входе в РМ  $T_2$  с 500 К до 400 К ведет к изменению коэффициента неидеальности на 0,2...0,6 %.

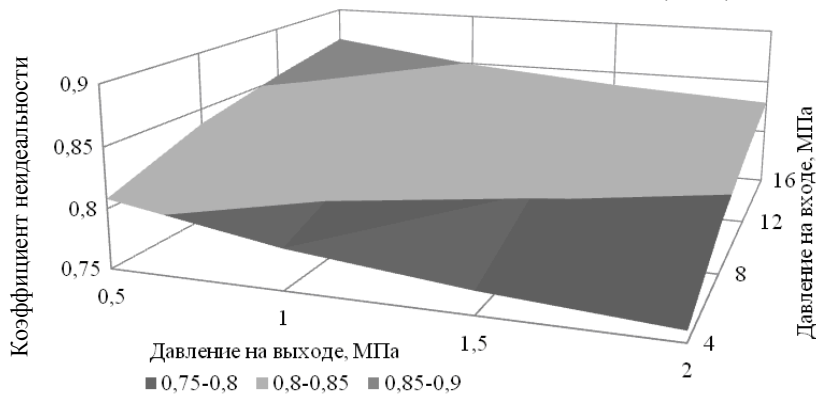


Рис. 3. Значения коэффициента неидеальности водорода при температуре на входе 500 К

Удельная мощность утилизационных металлгидридных установок, работающих на температурном режиме малооборотного ДВС, определены по алгоритму, приведенному в [1].

При температуре десорбции  $T_d = 350$  К удельная мощность  $Ne$  составляет  $0,47...1,37$  МВт/(кг/с), в зависимости от свойств металлгидридного материала, при температуре десорбции  $T_d = 400$  К,  $Ne = 1,74...3,32$  МВт/(кг/с), при  $T_d = 450$  К,  $Ne = 2,43...4,07$  МВт/(кг/с), при  $T_d = 500$  К  $Ne = 3,57...4,18$  МВт/(кг/с), рис. 4. При этом диапазон давления водорода  $0,5...15$  МПа.

Значения удельной мощности утилизационной металлгидридной установки непрерывного действия, полученные в [8], рис. 1 в целом соответствуют данным, приведенным на рис. 4.

Процесс расширения водорода в РМ утилизационной металлгидридной установке непрерывного действия с металлгидридным материалом, имеющим удельную энтальпию гидридообразований  $\Delta H = 20$  кДж/(mol H<sub>2</sub>) и температуру при давлении 1 атм.  $T^* = 270$  К, показан на T-S – диаграмме водорода, см. рис. 1.

### Выводы

1. Удельная мощность утилизационных металлгидридных установок непрерывного действия составляет  $0,71...4,11$  МВт/(кг/с), в зависимости от свойств металлгидридного материала и температуры десорбции. При этом ограничения по минимальному давлению  $P_{min}$  составляет  $0,5$  МПа, ограничение по максимальному давлению  $P_{max}$  составляет  $15$  МПа.

2. Максимальное значение удельной мощности достигается при температуре десорбции  $T_d = 500$  К.

3. Для диапазона давлений на входе в РМ  $P_2 = 4...16$  МПа и давлений на выходе из РМ  $P_3 = 0,5...2$  МПа, коэффициент неидеальности  $K_{neid}$  изменяется от  $0,75$  до  $0,95$ .

### Литература

1. Boston, M. A *Turboexpanders and Process Applications [Text]*/ M. A. Boston. – Gulf Professional Publishing, an imprint of Butterworth-Heinemann, 2001. – 523 p.

2. Эфффективность утилизации низкопотенциального тепла металлгидридными установками непрерывного действия [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С. М. Доценко [и др.] // Двигатели внутреннего сгорания. – 2014. – № 2. – С. 39-44.

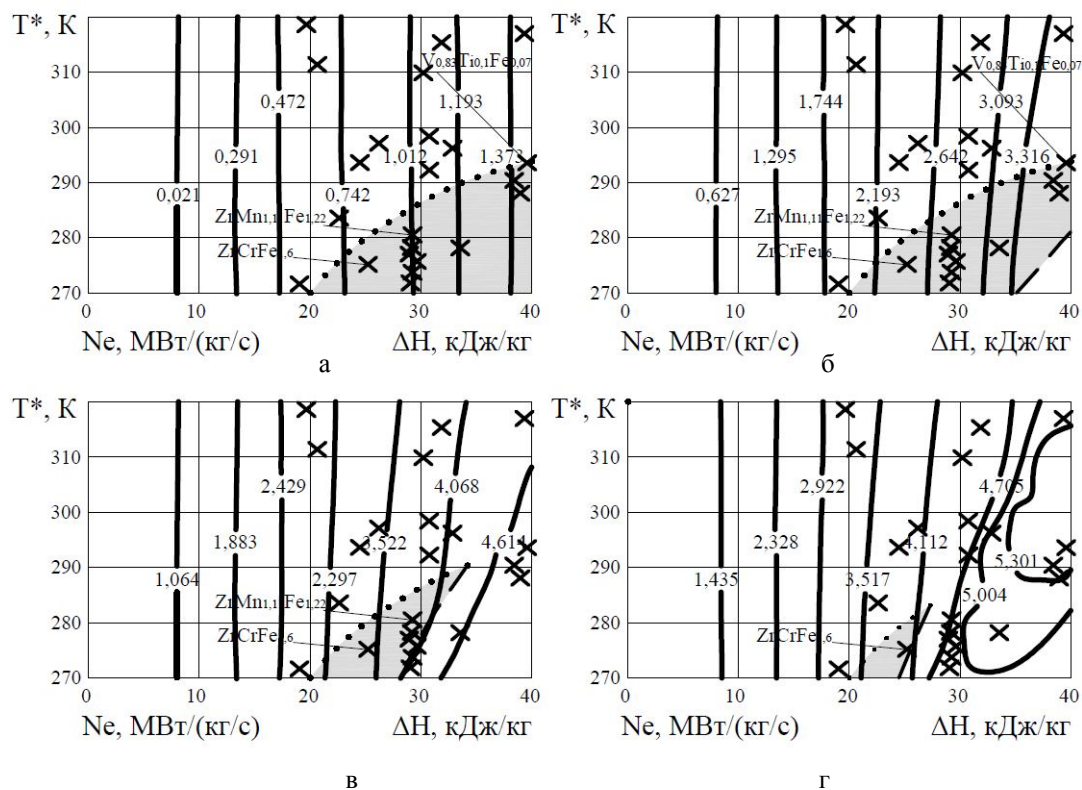


Рис. 4. Удельная мощность металлгидридной установки непрерывного действия в зависимости от свойств металлгидрида, МВт/(кг/с): а - температура десорбции  $T_d = 350$  К, б -  $T_d = 400$  К, в -  $T_d = 450$  К, г -  $T_d = 500$  К

3. Колачёв, Б. А. Сплавы-накопители водорода [Текст] : справочник / Б. А. Колачёв, Р. Е. Шалин, А. А. Ильин. – М. : Металлургия, 1995. – 384 с.

4. Broom, Daren P. Hydrogen Storage Materials [Text] / Darren P. Broom. – Springer-Verlag London Limited, 2011. – 258 p. – ISBN 978-0-85729-220-9.

5. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение [Текст] / Д. Ю. Гамбург, В. П. Семенов, Н. Ф. Дубовкин [и др.]. – М. : Химия, 1989. – 672 с.

6. Александров, А. А. Свойства и процессы рабочих тел и материалов атомной энергетики [Электронный ресурс] / А. А. Александров, К. А. Орлов, В. Ф. Очков. – Режим доступа: [http://twf.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/NPP/tab1\\_3\\_1\\_p.t.xmcd](http://twf.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/NPP/tab1_3_1_p.t.xmcd). – 4.04.2015.

7. Fundamental Equations State for Parahydrogen, Normal Hydrogen, and Orthohydrogen [Text] / J. W. Leachem, J. W. R.T. Jacobsen, S. G. Penoncello [et al.] // J. Phys.Chem. Ref. Data. – 2009. – Vol. 38, No 3. – P. 721 -748.

8. Утилизация низкопотенциального тепла малооборотных ДВС на базе гидридной технологии [Текст] / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, С. М. Доценко [и др.] // Авиационно-космическая техника и технологии. – 2013. – № 8 (105). – С. 61-67.

9. Properties of hydrogen [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www0.bnl.gov/magnets/staff/gupta/cryogenic-data-handbook/Section3.pdf>. – 4.04.2015.

Поступила в редакцию 17.06.2015, рассмотрена на редколлегии 23.06.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. кондиционирования и рефрижерации Н. И. Радченко, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина.

### ПИТОМА ПОТУЖНІСТЬ МЕТАЛОГІДРИДНИХ УТИЛІЗАЦІЙНИХ УСТАНОВОК БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ

*М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, С. М. Доценко, Ю. М. Галинкін*

Для уточнення розрахунку водневої розширювальної машини в широкому діапазоні тисків, при визначенні питомої потужності металогідридних утилізаційних установок безперервної дії, запропоновано використовувати коефіцієнт неідеальності, який являє собою відношення теплоперепаду (водень розглядається як ідеальний газ), до теплоперепаду (водень розглядається як реальний газ). Максимальне значення питомої потужності утилізаційної металогідридної установки безперервної дії, що працює на температурному режимі малооборотних ДВС при  $P_{\max} = 15 \text{ МПа}$ ,  $P_{\min} = 0,5 \text{ МПа}$ ,  $T_d = 500 \text{ К}$  становить 4,1 МВт / (кг/с)

**Ключові слова:** Водень, металогідрид, утилізація, теплоперепад, потужність.

### SPECIFIC POWER THE METAL HYDRIDE UTILIZATION CONTINUOUS POWER PLANTS

*M. R. Tkach, B. G. Timochevskiy, S. M. Docenko, Y. N. Galinkin*

To clarify the calculation of the hydrogen expansion engine in a wide range of pressures, in determining the specific power of utilization metal hydride continuous plants, it is suggested to use non-ideality coefficient, which is the ratio of heat drop (the hydrogen is viewed as an ideal gas) to heat drop (the hydrogen is viewed as a real gas). The maximum power density of the utilization installation metal hydride continuous operating temperature at slow-speed mode, the internal combustion engine when  $P_{\max} = 15 \text{ MPa}$ ,  $P_{\min} = 0.5 \text{ MPa}$ ,  $T_d = 500 \text{ K}$  is 4.1 MW/(kg/s).

**Keywords:** Hydrogen, metal hydride, recovery, heat drop, power.

**Ткач Михаил Романович** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. инженерной механики и технологии машиностроения Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: [mykhaylo.tkach@gmail.com](mailto:mykhaylo.tkach@gmail.com).

**Тимошевский Борис Георгиевич** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. двигателей внутреннего сгорания Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: [btym@mksat.net](mailto:btym@mksat.net).

**Доценко Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, доц., директор Первомайского политехнического института Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Первомайск, e-mail: [sergey.dotsenko@nuos.edu.ua](mailto:sergey.dotsenko@nuos.edu.ua).

**Галинкин Юрий Николаевич** – науч. сотр. Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: [MerchikDVS@yandex.ru](mailto:MerchikDVS@yandex.ru).