

Анализ адиабатного процесса расширения рабочего тела в открытой термодинамической системе с помощью диаграммы работы в P – V -координатах

Рецензия эксперта на статью получена 29.12.2018 [Expert review on the article received December 29, 2018].

Анализ адиабатного процесса расширения рабочего тела с газодинамическими потерями в открытой термодинамической системе с помощью тепловой диаграммы в T – S -координатах не полностью отражает картину изменений заторможенных и статических параметров в открытой системе, вызванную подводом внутренней теплоты, которая является результатом взаимодействия газодинамических сопротивлений с потоком. В связи с этим — для полноты картины — анализ с помощью тепловой диаграммы в координатах T – S необходимо расширить за счёт анализа того же процесса, но только с помощью диаграммы работы в P – V -координатах.

Тепловые воздействия в адиабатном потоке рабочего тела в открытой системе, как известно, определяются теплообменом, а силовые — давлением, но в зависимости от характера задачи все они требуют учёта.

Из уравнения энергии для открытых адиабатных систем следует, что взаимодействие газодинамических сопротивлений с потоком оказывает, как известно, двойное влияние на течение газа. Из этого уравнения также вытекает, что удельная работа, затрачиваемая на преодоление газодинамических сопротивлений δl_r , влияет на изменение внешней кинетической энергии рабочего тела, то есть оказывает непосредственное механическое влияние на действительную скорость в выходном сечении потока.

Из другого уравнения можно установить, что изменение полной энергии рабочего тела в потоке определяется не только механическим влиянием газодинамических сопротивлений на поток через работу δl_r , но также и термическим влиянием преобразованных в теплоту газодинамических потерь δq_r , которые усваиваются рабочим телом и создают

дополнительное тепловое сопротивление в канале. Механическое влияние газодинамических потерь скажется на величине внешней кинетической энергии и снижении заторможенного давления на выходе потока, термическое влияние — на изменении статических параметров и появлении теплового сопротивления, а оба вместе — на характере термодинамического процесса [5].

Из уравнения энергии для открытых адиабатных систем следует, что взаимодействие газодинамических сопротивлений с потоком оказывает, как известно, двойное влияние на течение газа

Поэтому рассмотрим адиабатический процесс расширения рабочего тела в потоке с помощью диаграммы работы в P – V -координатах. Графическая интерпретация термодинамического процесса представляет собой изображение в координатах P – V (рис. 1) того же процесса, что и на T – S -диаграмме.

Анализируя процесс адиабатного расширения рабочего тела в потоке, представленный на диаграмме P – V (рис. 1), можно выделить четыре характерных перепада давлений:

$$\Delta P^*, \Delta P, \Delta P_T \text{ и } \Delta P_\Sigma,$$

где $\Delta P^* = P_1^* - P_2^*$ — перепад заторможенных давлений на входе и выходе; $\Delta P = P_2^* - P_2$ — перепад заторможенного и статического давлений на выходе; $\Delta P_T = P_2 - P_T$ — перепад абсолютных статических давлений в адиабатном потоке относительно его изоэнтропного уровня; $P_\Sigma = P_1^* - P_T$ — суммарный перепад давлений в изоэнтропном процессе расширения рабочего тела в потоке.

УДК 536.7. Научная специальность: 05.04.02.

Анализ адиабатного процесса расширения рабочего тела в открытой термодинамической системе с помощью диаграммы работы в P – V -координатах

Андрей А. Балашов, д.т.н., профессор кафедры «Двигатели внутреннего сгорания»; **Максим Э. Брякотин**, к.т.н., доцент кафедры «Двигатели внутреннего сгорания»; **Константин В. Мамчур**, аспирант, Алтайский государственный технический университет (АлтГТУ) им. И.И. Ползунова

Проведён краткий анализ адиабатного процесса расширения рабочего тела в открытой термодинамической системе с использованием диаграммы работы в координатах P – V . С помощью некоторых выражений наглядно показано и доказано, что взаимодействие газодинамических сопротивлений с потоком в каналах приводит к увеличению на выходе потока статических температуры, давления и удельного объёма. Проведено разделение на составляющие газодинамических потерь по способам воздействия на них.

Ключевые слова: адиабатический процесс, газодинамический, механический, термический, статический, тепловой, воздействие, поток.

UDC 536.7. Number of scientific specialty: 05.04.02.

Analysis of the adiabatic process of expansion of the working body in the open thermodynamic system by means of the diagram of work in P – V -coordinates

Andrei A. Balashov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Internal Combustion Engines; **Maxim E. Bryakotin**, PhD, Associate Professor of the Department of the Internal Control Engine; **Konstantin V. Mamchur**, PhD student, Altai State Technical University named after I. I. Polzunov (Barnaul city)

A brief analysis of the adiabatic process of expanding the working fluid in an open thermodynamic system was performed using the work diagram in the P – V -coordinates. With the help of some expressions, it is clearly shown and proved that the interaction of gas-dynamic resistances with the flow in the channels leads to an increase in the output of the flow of static temperature, pressure and specific volume. The separation into components of gas-dynamic losses by the methods of influence on them was carried out.

Key words: adiabatic process, gas-dynamic, mechanical, thermal, static, thermal, impact, flow.

Перепад заторможенных давлений в адиабатном потоке ΔP^* характеризует величину основных газодинамических потерь, возникающих в процессе взаимодействия газодинамических сопротивлений с потоком. В результате этого затрачивается работа по преодолению сопротивлений в канале (отрывные течения и др.), которая приводит к снижению как заторможенного давления на выходе потока P_2^* относительно давления на входе P_1^* , так и к появлению внутренней теплоты от преобразования механической работы при $T^* = \text{const}$ $P_1^* - P_2^* - P_3^*$, причём при наличии газодинамических потерь в потоке всегда будет $P_1^* > P_2^* > P_3^*$ (рис. 1).

Помимо этого, перепад заторможенных давлений ΔP^* в адиабатном процессе расширения рабочего тела характеризует основную долю необратимой части газодинамических потерь в движущемся потоке.

На выходе потока из канала перепад заторможенного и статического давлений ΔP характеризует величину располагаемой полезной работы, которая может быть реализована в располагаемую кинетическую энергию, то есть в действительную скорость потока. Чем меньше будет перепад давлений ΔP , тем больше будут газодинамические потери при одних и тех же условиях на входе потока. Помимо этого, с точки зрения термодинамики, перепад давлений ΔP представляет собой обратимую долю изоэнтропного процесса расширения рабочего тела в потоке.

Перепад абсолютных статических давлений ΔP_T соответствует разнице между статическим давлением P_2 или P_3 в адиабатном потоке и статическим теоретическим давлением P_T в изоэнтропном потоке.

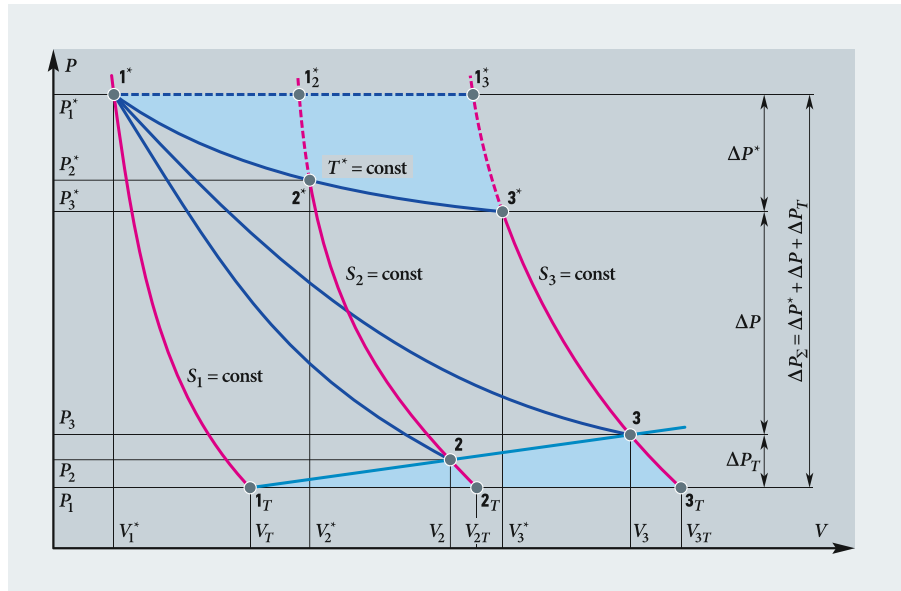


Рис. 1. Диаграмма расширения рабочего тела в адиабатном процессе в P - V -координатах (P_1^* , P_2^* и P_3^* — изоэнтропно заторможенные абсолютные давления в потоке на входе и выходе из канала; P_2 и P_3 — абсолютные статические давления в потоке на выходе; P_T — абсолютное статическое теоретически достижимое давление в изоэнтропном потоке)

Превышение статических давлений P_2 или P_3 в адиабатном потоке над статическим теоретически достижимым давлением в изоэнтропном потоке P_T возникает из-за трения и отрывных течений при движении рабочего тела по каналу, что приводит к снижению заторможенного давления на выходе P_2^* или P_3^* и возникновению механической работы δl_r . Работа δl_r трансформируется в теплоту δq_r и усваивается потоком, в результате чего увеличиваются статические параметры, такие как температура T_2 , давление P_2 и удельный объём θ_2 , которые характеризуют ещё и термическое воздействие газодинамических сопротивлений в канале на поток. Поэтому с увеличением перепада давлений ΔP_T будет расти и результирующее суммарное изменение энтропии в адиабатном потоке ΔS (рис. 1).

Помимо этого, перепад давлений ΔP_T в адиабатном процессе расширения рабочего тела характеризует меньшую долю (термическую) необратимой части газодинамических потерь в потоке.

Итак, можем записать, что необратимая часть адиабатного процесса расширения рабочего тела характеризующаяся перепадом заторможенных и статических ΔP_T давлений (рис. 1), будет выглядеть так:

$$\Delta P_{\text{пот}} = \Delta P^* + \Delta P_T = \Delta P_{\Sigma} - \Delta P, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{пот}}$ — суммарный перепад давлений, характеризующий суммарные газодинамические потери в адиабатном потоке; ΔP_{Σ} — суммарный перепад давлений в изоэнтропном процессе расширения рабочего тела в потоке.

Суммарный перепад давления в изоэнтропном потоке ΔP_{Σ} может быть представлен суммой перепадов давлений, состоящей из: перепада заторможенных давлений ΔP^* , перепада заторможенного и статического давлений ΔP_T и перепада абсолютных статических давлений в адиабатном потоке относительно изоэнтропного уровня ΔP^* ; или суммой перепада заторможенного и статического давлений ΔP и перепада давлений, характеризующего суммарные газодинамические потери в адиабатном потоке:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P^* + \Delta P + \Delta P_T = \Delta P + \Delta P_{\text{пот}}. \quad (2)$$

Перепад давлений ΔP_{Σ} в потоке характеризует как обратимую долю адиабатного процесса расширения рабочего тела, так и необратимую, образовавшуюся за счёт взаимодействия газодинамических сопротивлений с потоком.

Проведённый термодинамический анализ влияния газодинамических сопротивлений на параметры потока по давлению с помощью диаграммы работы, позволил



наглядно показать и разложить на составляющие суммарные газодинамические потери $\Delta P_{\text{пот}}$, которые видны на диаграмме (рис. 1), — это заштрихованные участки диаграммы, как от механического взаимодействия газодинамических сопротивлений с потоком характеризуемые перепадом заторможенных давлений ΔP^* , так и от термического взаимодействия характеризуемые перепадом статических давлений ΔP_T .

Для установления связи параметров в движущемся потоке и определения газодинамических потерь (между выбранными контрольными сечениями 1–1 и 2–2) необходимо решить две системы уравнений, содержащих по два уравнения в изоэнтропной и адиабатной постановке:

$$P_1^* \vartheta_1^{*m} = P_2 \vartheta_2^m; \quad (3)$$

$$P_2^* \vartheta_2^{*k} = P_2 \vartheta_2^k; \quad (4)$$

$$P_1^* \vartheta_1^{*k} = P_T \vartheta_T^k; \quad (5)$$

$$P_2^* \vartheta_2^{*k} = P_2 \vartheta_2^k; \quad (6)$$

где P_1^* , P_2^* , P_2 и P_T — соответственно, абсолютные заторможенные, статические и теоретические давления в соответствующих сечениях потока; ϑ_1^* , ϑ_2^* , ϑ_2 и ϑ_T — удельные объёмы, соответственно, определённые по заторможенному и статическим параметрам потока; m и k — соответственно, показатели адиабатного и изоэнтропного процессов расширения рабочего тела в потоке.

Используя приведённые выражения, можно получить альтернативные зависимости, которыми можно в дальнейшем воспользоваться.

При выводе зависимостей принимаются следующие допущения: процесс расширения газа принимается адиабатическим; показатель изоэнтропного процесса расширения рабочего тела k , удельные теплоёмкости c_p и c_v принимаются постоянными по потоку.

При рассмотрении течения в потоке при изотермическом, адиабатическом и политропном процессах расширения, рабочее тело принимается подчиняющимся уравнению Клапейрона. Таким образом, получить альтернативные выражения для адиабатных открытых систем можно, решая совместно приведённые выше зависимости (3–6) в различных комбинациях.

Решая совместно уравнения (3) и (4) с учётом равенства $T^* = \text{const}$ по потоку и уравнения состояния, получим:

$$\frac{P_2}{P_2^*} = \left(\frac{P_2^*}{P_1^*} \right)^{\frac{1}{\xi}}, \quad (7)$$

откуда коэффициент газодинамических потерь ξ :

$$\xi = \ln \left(\frac{P_2^*}{P_1^*} \right) / \ln \left(\frac{P_2}{P_2^*} \right). \quad (8)$$

Решая совместно уравнения (5) и (6) с учётом равенства $T^* = \text{const}$ по потоку и уравнения состояния, получим:

$$\frac{T_2}{T_T} = \left(\frac{P_1^* P_2}{P_2^* P_T} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (9)$$

где T_T — абсолютная термодинамическая теоретически достижимая температура в изоэнтропном процессе расширения; T_2 — абсолютная статическая температура в адиабатном процессе расширения газа в выходном сечении потока; P_T — абсолютное теоретически достижимое статическое давление в изоэнтропном процессе расширения газа в потоке; P_2 — абсолютное статическое давление в адиабатном процессе расширения газа в выходном сечении потока.

Из выражения (9) следует, что в качестве базовых параметров в этой зависимости можно принять статические, теоретически достижимые в изоэнтальпном процессе расширения рабочего тела абсолютные давление P_T и температуру T_T , то есть параметры, при достижении которых выдерживается условие $dS = 0$ или $S_1 = S_2 = \text{const}$.

Прологарифмируем выражение (9), тогда будем иметь:

$$\frac{k}{k-1} \ln \left(\frac{T_2}{T_T} \right) = \ln \left(\frac{P_1^*}{P_2^*} \right) + \ln \left(\frac{P_2}{P_T} \right), \quad (10)$$

Разделим правую и левую части равенства (10) на $\ln(P_2^*/P_2)$, получим:

$$\frac{k}{k-1} \frac{\ln \left(\frac{T_2}{T_T} \right)}{\ln \left(\frac{P_2^*}{P_2} \right)} = \frac{\ln \left(\frac{P_1^*}{P_2^*} \right)}{\ln \left(\frac{P_2^*}{P_2} \right)} + \frac{\ln \left(\frac{P_2}{P_T} \right)}{\ln \left(\frac{P_2^*}{P_2} \right)}. \quad (11)$$

Левая часть выражения (11), это суммарный коэффициент газодинамических потерь ξ_a , который определяется после преобразования левой части через температурные параметры, и выглядит так:

$$\xi_a = \ln \left(\frac{T_2}{T_T} \right) / \ln \left(\frac{T^*}{T_2} \right), \quad (12)$$

где ξ_a — суммарный коэффициент газодинамических потерь в выходном сечении адиабатного потока.

Первый член правой части выражения (11), это коэффициент газодинамических потерь, характеризующий механическое воздействие газодинамических сопротивлений в канале на рабочее тело, приводящее к снижению заторможенного давления P_2^* (рис. 1):

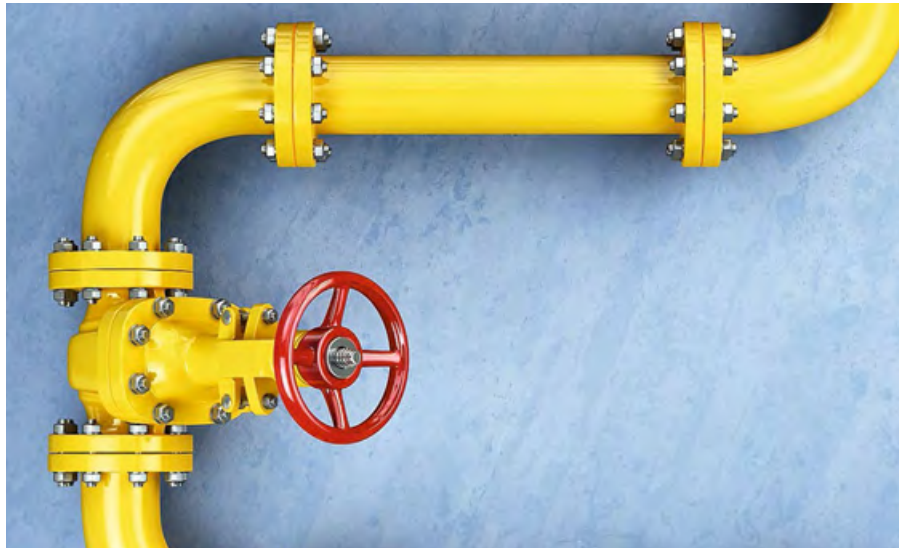
$$\xi_{ам} = \ln \left(\frac{P_1^*}{P_2^*} \right) / \ln \left(\frac{P_2^*}{P_2} \right), \quad (13)$$

где $\xi_{ам}$ — коэффициент газодинамических потерь характеризующий механическое взаимодействие газодинамических сопротивлений с потоком.

Второй член правой части выражения (11) — это коэффициент газодинамических потерь, характеризующий термическое воздействие газодинамических сопротивлений в канале на рабочее тело, приводящее к возникновению термического сопротивления в потоке и увеличению статического давления P_2 в выходном сечении потока относительно изоэнтальпного уровня P_T :

$$\xi_{ат} = \ln \left(\frac{P_2}{P_T} \right) / \ln \left(\frac{P_2^*}{P_2} \right), \quad (14)$$

где $\xi_{ат}$ — коэффициент газодинамических потерь характеризующий термические преобразования в потоке.



Анализируя выражение (11) можно сказать, что в процессе адиабатного расширения рабочего тела в открытой системе существует два вида термогазодинамических потерь, которые образуются в результате взаимодействия с потоком газодинамических сопротивлений в канале, классифицировать которые можно следующим образом:

- основные газодинамические потери образующиеся за счёт механического взаимодействия газодинамических сопротивлений с потоком, характеризующиеся заторможенным перепадом давлений ΔP^* , при адиабатном расширении рабочего тела в открытой системе (рис. 1);
- дополнительные потери (в этом же процессе) возникающие за счёт преобразования газодинамических потерь в теплоту, характеризующую статическим перепадом давлений ΔP_T , которая усваивается потоком и создаёт добавочное тепловое (термическое) сопротивление (рис. 1);

□ суммарные термогазодинамические потери представляющие результат совместного влияния сопротивлений на адиабатный поток при механическом и термическом взаимодействии сопротивлений с потоком.

В связи с этим возникает необходимость отображать в расчётных зависимостях, таких как изменение энтропии ΔS и энтальпии Δi , коэффициентов газодинамических потерь ξ и расхода m , способы взаимодействия газодинамических сопротивлений с потоком — механический, термический и результирующий. Поэтому для обозначения перечисленных способов влияния газодинамических сопротивлений на параметры потока предлагается использовать нижние индексы, такие как:

- индекс «а» характеризует результирующий (механический плюс термический) способы влияния газодинамических сопротивлений на параметры адиабатного потока;



□ индекс «ам» характеризует только механический способ влияния тех же сопротивлений на параметры адиабатного потока;

□ индекс «ат» характеризует только термический способ влияния тех же сопротивлений на параметры адиабатного потока.

Однако нужно иметь в виду, что для определения коэффициента газодинамических потерь ξ получены и другие выражения, с помощью которых этот коэффициент может быть определён через логарифм отношения заторможенных и статического давлений зависимость (8).

На первый взгляд коэффициенты газодинамических потерь ξ , представленные зависимостями (8) и (12), должны быть равнозначны, однако в действительности они имеют различные значения в связи с тем, что один из них (12) учитывает результирующие (суммарные) термогазодинамические потери, связанные с механическим и термическим влиянием газодинамических сопротивлений, так как определяется по заторможенным и статическим температурным параметрам в адиабатном потоке с учётом теоретически достижимой температуры T_T в изэнтропном процессе расширения, поэтому коэффициент ξ , представленный зависимостью (12), приобретает индекс « α » и будет обозначаться как ξ_α .

Другой коэффициент ξ , представленный зависимостью (8), определяется по заторможенным и статическому давлению в адиабатном потоке без учёта изэнтропной базы P_T , из-за чего он будет учитывать только механическое (без термического) влияние на параметры потока газодинамических сопротивлений в канале, поэтому он обозначится $\xi_{ам}$.

Отсюда следует, что результирующий (суммарный) коэффициент газодинамических потерь в выходном сечении адиабатного потока ξ_a может быть представлен в виде суммы коэффициентов газодинамических потерь, полученных как при механическом взаимодействии с потоком сопротивлений в канале $\xi_{ам}$, так и при термическом взаимодействии теплоты $\xi_{ат}$, возникающей от преобразования газодинамических потерь, и представляется зависимостью:

$$\xi_a = \xi_{ам} + \xi_{ат}. \quad (15)$$

Таким образом, в результате проведённого анализа адиабатного процесса расширения рабочего тела в открытой системе с использованием диаграммы работы в P – V -координатах наглядно показаны заштрихованные зоны характеризующие газодинамические потери от механического и термического взаимодействия сопротивлений с потоком (рис. 1). Кроме того, с помощью полученных выражений (9), (13) и (14) показано, что газодинамические потери, характеризующиеся коэффициентами ξ , по параметрам давления делятся на две части: одна характеризуется коэффициентом $\xi_{ам}$, отражающим механическое взаимодействие сопротивлений с потоком, другая — коэффициентом $\xi_{ат}$, отражающим тепловое взаимодействие сопротивлений с потоком. ●

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. — М.: Наука, 1969. 824 с.
2. Балашов А.А. Техническая термодинамика: Часть 2. Основы термогазодинамики открытых систем. — Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. 101 с.
3. Вулис Л.А. Термодинамика газовых потоков. — М.: Госэнергоиздат, 1950. 305 с.
4. Зысин В.А. Техническая термодинамика потока. — Ленинград: Изд-во ЛГУ, 1977. 158 с.
5. Мамонов М.А. Некоторые случаи течения газов. — М.: Оборонгиз, 1951. 490 с.
6. Луканин В.Н., Шатров М.Г. и др. Теплотехника: Учеб. для вузов / Под ред. В.Н. Луканина. — М.: Высшая школа, 2006. 671 с.

Analysis of the adiabatic process of expansion of the working body in the open thermodynamic system by means of the diagram of work in P – V -coordinates. Pp. 74–79.

Andrei A. Balashov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Internal Combustion Engines; **Maxim E. Bryakotin**, PhD, Associate Professor of the Department of the Internal Control Engine; **Konstantin V. Mamchur**, PhD student, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov (Barnaul city)

1. Abramovich G.N. *Prikladnaja gazovaja dinamika* [Applied gas dynamics]. Moscow. Nauka ["The Science" Publishing House], 1969. 824 p.
2. Balashov A.A. *Tekhnicheskaja termodinamika: Chast' 2. Osnovy termogazodinamiki otkrytyh sistem* [Technical thermodynamics: Part 2. Basics of thermogas dynamics of open systems]. Barnaul. *Izd-vo AltGTU* [Publishing House of the Altai State Technical University], 2014. 101 p.
3. Vulis L.A. *Termodinamika gazovykh potokov* [Thermodynamics of gas flows]. Moscow. Gosenergoizdat ["Gosenergoizdat" Publishing House (State Publishing House of the Energy Industry)], 1950. 305 p.
4. Zysin V.A. *Tekhnicheskaja termodinamika potoka* [Technical thermodynamics of flow]. Leningrad: *Izd-vo LGU* [Publishing House of Leningrad State University], 1977. 158 p.
5. Mamontov M.A. *Nekotorye sluchai techenija gazov* [Some cases of gas flow]. Moscow. Oborongiz ["Oborongiz" Publishing House (State publishing house of defense industry)], 1951. 490 p.
6. Lukanin V.N., Shatrov M.G. et al. *Teplotekhnika: Ucheb. dlja vuzov* [Heat Engineering: A textbook for universities]. Pod red. V.N. Lukanina [Ed. by V.N. Lukanin]. Moscow. Vysshaja shkola ["High school" Publishing House], 2006. 671 p.