

А. Л. ШУБЕНКО, В. П. САРАПИН

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА THERMAL SCHEME ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ СХЕМ

Приведено описание и основные особенности использования разработанного в ИПМаш НАН Украины программного комплекса Thermal Scheme, позволяющего проводить расчетные исследования тепловых схем с использованием реальных свойств разных рабочих тел. В качестве примера, демонстрирующего возможности предлагаемого программного комплекса, выполнены расчетные исследования тепловой схемы низкотемпературной сепарации природного газа с применением турбодетандерного агрегата. Приведены результаты расчетных исследований рассматриваемой схемы.

Ключевые слова: программный комплекс, рабочее тело, тепловая схема, турбодетандерный агрегат, турбина, компрессор, сепаратор, низкотемпературная сепарация.

О. Л. ШУБЕНКО, В. П. САРАПИН

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ THERMAL SCHEME ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОВИХ СХЕМ

Наведено опис і основні особливості використання розробленого в ИПМаш НАН України програмного комплексу Thermal Scheme, що дозволяє проводити розрахункові дослідження теплових схем з використанням реальних властивостей робочих тіл. Як приклад, який демонструє можливості пропонованого програмного комплексу виконані розрахункові дослідження теплової схеми низкотемпературної сепарації природного газу з застосуванням турбодетандерного агрегату. Наведені результати розрахункових досліджень розглянутої схеми.

Ключові слова: програмний комплекс, робоче тіло, теплова схема, турбодетандерний агрегат, турбіна, компресор, сепаратор, низкотемпературна сепарація.

O. SHUBENKO, V. SARAPIN

PECULIARITIES OF THE USE OF SOFTWARE SYSTEM THERMAL SCHEME TO COMPUTE HEAT BALANCE DIAGRAMS

Drawbacks of the most known software systems used for the calculated analysis of heat balance diagrams were analyzed. A short description of the software program Thermal Scheme including the main peculiarities of it has been given. This software system allows us to carry out the calculated analysis of heat balance diagrams using the real properties of actuating media. A list of the elements the most frequently used for the calculated analysis of heat balance diagrams has been given. The equation systems that are used for the calculation of the elements of heat balance diagrams using the Thermal Scheme software system were also given. To demonstrate the opportunities of the suggested software system we carried out as an example the calculated analysis of the heat balance diagram used for a low-temperature separation of the natural gas using the turboexpander unit. The calculated analysis data on the estimation of material and power balances and thermodynamic indices of diagram elements were given for the diagram in question. As a result using no manual selection we obtained the heat exchanger output temperature for the direct flow and the turbine output pressure when executing the power balance between the turbine and the compressor of turboexpander unit. It allowed us to curtail the time required for the calculated analysis. The given information demonstrates the advantages of the Thermal Scheme software system.

Key words: software system, actuating medium, heat balance diagram, turboexpander unit, turbine, compressor, separator and a low-temperature separation.

Введение

С развитием современных технологий нефтегазовой, химической и энергетической отраслей появилась необходимость в разработке новых и в анализе существующих технологических схем. В настоящее время разработано много программных продуктов, которые широко используются при расчетах тепловых схем. Наиболее известными являются: ГАЗКОНДНЕФТЬ, GIBBS, Hysys, PRO-II, CHEMCAD, Scheme, Thermoflow и др. [1–4], но в большинстве случаев эти программы имеют ряд существенных недостатков:

- 1) узкая направленность, только для одной отрасли;
- 2) использование только одного рабочего тела и отсутствие возможности создания или дополнения базы новыми составами;

- 3) невозможность или сложность:
 - дополнять схемы новыми элементами;
 - определять и вносить характеристики режимов работы элементов;
 - определять и вносить геометрические характеристики элементов;
 - задавать поле входных параметров для получения общей картины области работы всей схемы;
- 4) другие моменты, не позволяющие создавать сложные схемы, а также проводить расчеты без ручного подбора некоторых параметров.

Поэтому появилась необходимость в создании программного комплекса с учетом устранения указанных недостатков.

Цель работы

Целью данной работы является описание реали-

© А. Л. Шубенко, В. П. Сарапин, 2018

зованных преимуществ в программном комплексе *Thermal Scheme* по сравнению с существующими программными продуктами предназначенных для расчетов тепловых схем, а также приведение результатов расчета на примере схемы низкотемпературной сепарации природного газа.

Краткое описание программного комплекса *Thermal Scheme*

Программный комплекс *Thermal Scheme* был создан с помощью объектно-модульного программирования в среде *Visual Basic for Applications* с использованием новых и ранее разработанных в институте проблем машиностроения НАН Украины методик и алгоритмов [5–7].

Программный комплекс состоит из трех рабочих областей: рабочий лист «*Work*», лист с термодинамическими свойствами «*Streams*», лист с энергетическими показателями «*Energy*».

На листе «*Work*» происходит компоновка тепловой схемы из элементов, которые копируются из базы данных. В листе «*Streams*» отображаются результаты расчетов термодинамических параметров в «связных точках» входа и выхода элементов схемы. В листе «*Energy*» отображаются результаты расчетов энергетических параметров: мощности, тепловой энергии.

Расчетная тепловая схема в программном комплексе компонуется из таких основных элементов: турбина, компрессор, турбодетандерный агрегат, сепаратор, теплообменник, испаритель, конденсатор, подогреватель, охладитель, электрогенератор, дросселирующее устройство; вспомогательные элементы: смеситель, разделитель, узел управления.

Каждый элемент тепловой схемы соединяется с последующим с помощью узла «связной точки». Каждая «связная точка» имеет свой номер и является для одного элемента выходной, а для другого входной.

После построения расчетной схемы в первом ее элементе выбирается компонентный состав газа из выпадающего списка, в случае отсутствия требуемого состава газа, его необходимо насчитать и добавить в базу данных составов с помощью подпрограммы «*Состав*».

После выбора состава необходимо задать термодинамические параметры и расход рабочего тела на входе в первом элементе схемы и на выходе в последнем элементе схемы. В соединительных точках, в которых нужно провести итерационный подбор параметра, необходимо ввести «*sel*», в остальных оставить пустым окно, программа сама определит незадаанные параметры на основании материального и энергетического баланса по всем элементам схемы по уравнениям:

$$G_{in} = G_{out} + \sum_{n=1}^k \Delta G_n ;$$

$$G_{in} \cdot i_{in} - G_{out} \cdot i_{out} = \sum_{n=1}^k N_n + \sum_{n=1}^k Q_n ,$$

где G_{in} , G_{out} – массовый расход рабочего тела на входе в первый элемент и на выходе из последнего элемента схемы, кг/с;

i_{in} , i_{out} – удельная массовая энтальпия на входе в первый элемент и на выходе из последнего элемента схемы, кДж/кг;

N – потребляемая или вырабатываемая мощность элементом, кВт;

Q – подвод или отвод тепловой энергии к элементу схемы, кВт;

ΔG – утечка или отбор рабочего тела из элемента схемы;

k – количество элементов в схеме;

n – номер элемента.

В случае невозможности найти решение, при заданных условиях, программа выдаст сообщение об ошибке с информацией об её устранении.

Физические свойства определяются по данным, сведенных в таблицы, которые были насчитаны по уравнению состояния Пенга-Робинсона или взяты из справочников для необходимого рабочего тела [8–10].

В программном комплексе по функциям двух переменных (давления и температуры) определяются следующие параметры:

– энтальпия $i = i(P, t)$;

– энтропия $S = S(P, t)$;

– плотность $\rho = \rho(P, t)$;

– степень сухости $x = x(P, t)$;

– кинематическая вязкость $\nu = \nu(P, t)$;

– теплоемкость $C_p = C_p(P, t)$;

– теплопроводность $\theta = \theta(P, t)$.

Каждый элемент схемы может рассчитывать по четырем уровням:

1. Термодинамический расчет.
2. Термо-газодинамический расчет. Определение геометрических размеров.
3. Расчет характеристик на режимах, отличных от номинального.
4. Ориентировочный расчет массогабаритных показателей.

Из-за громоздкости алгоритмов расчетов и систем уравнений в данной публикации приведены только системы уравнений по 1 уровню расчета.

Термодинамический расчет элементов

Каждый основной элемент описан своей системой уравнений.

Турбина:

$$N_t = G(i_{in} - i_{outs})\eta_t ;$$

$$i_{in} = i_{in}(P_{in}, t_{in}) ;$$

$$i_{outs} = i_{outs}(P_{out}, t_{outs}(P_{out}, S_{in}(P_{in}, t_{in})));$$

$$i_{out} = i_{in} - (i_{in} - i_{outs})\eta_t;$$

$$t_{out} = t_{out}(P_{out}, i_{out}).$$

Компрессор:

$$N_k = G(i_{outs} - i_{in})\frac{1}{\eta_k};$$

$$i_{in} = i_{in}(P_{in}, t_{in});$$

$$i_{outs} = i_{outs}(P_{out}, t_{outs}(P_{out}, S_{in}(P_{in}, t_{in})));$$

$$i_{out} = i_{in} + (i_{outs} - i_{in})\frac{1}{\eta_k};$$

$$t_{out} = t_{out}(P_{out}, i_{out}).$$

Для турбодетандерного агрегата, состоящего из турбины и компрессора, которые расположены на одном валу, кроме выше упомянутых уравнений добавляются еще следующие:

$$N_t = N_k + \Delta N;$$

$$P_{in_k} = P_{out_t} - \Delta P,$$

где ΔN – потери мощности на механическое трение в элементах агрегата.

Сепаратор:

$$P_{in} = P_{out} + \Delta P;$$

$$i_{in}G_{in} = i_{out_vap}G_{out_vap} + i_{out_liq}G_{out_liq};$$

$$x = x(P_{in}, t_{in}).$$

Теплообменник, испаритель, конденсатор:

$$G_1(i_{in1} - i_{out1})\eta_{he} = G_2(i_{out2} - i_{in2});$$

$$P_{in1} = P_{out1} + \Delta P_1; P_{in2} = P_{out2} + \Delta P_2.$$

Подогреватель:

$$G(i_{out} - i_{in}) = Q; P_{in} = P_{out} + \Delta P.$$

Охладитель:

$$G(i_{in} - i_{out}) = Q; P_{in} = P_{out} + \Delta P.$$

Электрогенератор:

$$N_g = N_t\eta_g.$$

Дросселирующее устройство:

$$P_{in} = P_{out} + \Delta P;$$

$$i_{in} = i_{out}; i_{in} = i_{in}(P_{in}, t_{in});$$

$$t_{out} = t_{out}(P_{out}, i_{out}).$$

Смеситель:

$$\sum_{m=1}^k (G_{in}i_{in})_m = G_{out}i_{out};$$

$$i_{in} = i_{in}(P_{in}, t_{in}); t_{out} = t_{out}(P_{out}, i_{out});$$

$$\sum_{m=1}^k (G_{in})_m = G_{out}.$$

Разделитель:

$$i_{in} = i_{out}; t_{in} = t_{out}; P_{in} = P_{out};$$

$$G_{in} = \sum_{m=1}^k (G_{out})_m.$$

Узел управления:

$$Y_{out} = XY_{in} + \Delta Y,$$

где Y – сигнал (физический или энергетический параметр), X – поправочный коэффициент, ΔY – поправочное значение сигнала.

Расчет упрощенной схемы низкотемпературной сепарации природного газа

В качестве примера, демонстрирующего возможности предлагаемого программного комплекса *Thermal Scheme*, представлен расчет упрощенной схемы низкотемпературной сепарации природного газа (рис. 1).

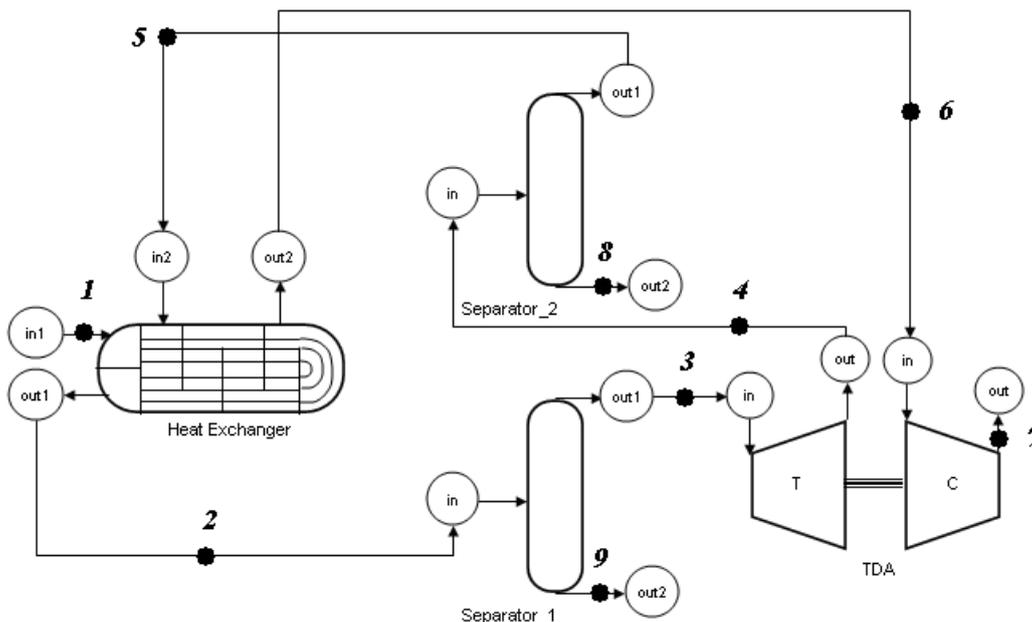


Рис. 1 – Упрощенная схема низкотемпературной сепарации природного газа:

1–7 – потоки газа; 8 и 9 – потоки газового конденсата; Heat Exchanger – теплообменник; Separator_1 и Separator_2 – сепараторы 1 и 2; T – турбина; C – компрессор турбодетандерного агрегата TDA

Принцип работы схемы: первый газовый поток входит в теплообменник и охлаждается обратным потоком, далее поток направляется в первый сепаратор, где происходит отделение жидкой фракции от газообразной. После первого сепаратора газообразная фракция направляется в турбодетандерный агрегат в турбинную часть, где происходит практически адиабатное расширение газа с одновременным его охлаждением. При этом вырабатывается механическая энергия, которая затрачивается на привод компрессора турбодетандерного агрегата. После турбины газ направляется во второй сепаратор, где происходит отделение жидкой фракции от газообразной. Газообразная фракция направляется во второй поток теплообменника, в котором нагревается за счет первого потока. После теплообменника газ подается в компрессор ТДА, где сжимается и направляется далее в газовую магистраль.

Особенностью такой схемы является то, что её расчет путем решения прямой термодинамической задачи не может быть выполнен из-за наличия рекуперативного теплообменника с одним и тем же потоком по прямому и по обратному направлению. Действительно, в этом случае при использовании прямого расчета, необходимо было бы вручную подбирать температуру на выходе из теплообменника по прямому потоку и пересчитывать температуру на выходе из турбины ТДА, уточнять температуру на входе и выходе теплообменника по обратному потоку и так далее для всех последующих элементов, стоящих в этой цепочке. Кроме этого, при выпадении конденсата в сепараторах 1 и 2 возникает необходимость учета изме-

нения составов и массовых расходов газа по элементам, стоящим после каждого из сепараторов.

Еще одной особенностью этой схемы является наличие турбодетандерного агрегата, что добавляет еще один неизвестный параметр при прямом расчете – давление на выходе из турбины, так как для работы турбодетандерного агрегата должно выполняться условие равенства мощностей турбины и компрессора.

Предлагаемый программный комплекс позволяет решить данную задачу без использования процесса ручного подбора температуры газа на выходе из теплообменника по прямому потоку и давления на выходе из турбины ТДА при заданном условии «*set*».

Исходные данные для расчета:

– молярный состав газа: метан – 87,8 %, этан – 3,81 %, пропан – 1,69 %, изо-бутан – 0,24 %, н-бутан – 0,67 %, изо-пентан – 0,99 %, азот – 1,41 %, углекислый газ – 3,39 %;

– параметры на входе в рекуперативный теплообменник: абсолютное давление 7,0 МПа, температура 30 °С, массовый расход газа 10 кг/с;

– абсолютное давление на выходе из компрессора ТДА 5,0 МПа;

Коэффициент полезного действия турбины и компрессора принят 80 %, коэффициент полезного действия теплообменника 97 %, потери мощности между турбиной и компрессором 20 кВт, гидравлическое сопротивление в теплообменнике 50 кПа, в сепараторах 0 кПа.

Результаты расчета приведены в табл. 1, номера точек соответствуют упрощенной схеме (рис. 1).

Таблица 1 – Результаты расчета

Наименование	№ точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Степень сухости	1	1	1	0,9744	1	1	1	0	0
Давление, МПа	7,0	6,95	6,95	3,80	3,80	3,75	5,0	3,80	–
Температура, °С	30,0	0,0	0	–30,47	–30,47	4,963	29,14	–30,47	–
Энтальпия, кДж/кг	–4613,0	–4693,5	–4693,5	–4734,7	–4835,3	–4749,5	–4707,8	–3168,9	–
Энтропия, кДж/кг	7,757	7,479	7,479	7,522	7,895	8,230	8,258	1,71	–
Массовый расход, кг/с	10	10	10	10,0	9,396	9,396	9,396	0,604	0

Как видно из табл. 1 после охлаждения газа в теплообменнике т. 2 нет выпадения конденсата, поэтому в т. 9 нет расхода газового конденсата в отвод первого сепаратора. После турбины ТДА т. 4 появляется конденсат и, следовательно, отвод газового конденсата из второго сепаратора т. 8. Оставшаяся часть газа направляется в теплообменник и затем в компрессор.

Расчетная мощность турбины составила 411,4 кВт, а компрессора – 391,4 кВт, что удовлетворяет требованиям к балансу мощностей с учетом механических потерь.

Выводы

Представлено краткое описание и основные особенности разработанного в ИПМаш НАН Украины программного комплекса *Thermal Scheme*, позволяющего рассчитывать сложные тепловые схемы на разных рабочих телах.

В качестве примера представлены результаты расчета тепловой схемы низкотемпературной сепарации природного газа с применением турбодетандерного агрегата.

В результате определена температура газа на выходе из теплообменника по прямому потоку и найдено давление на выходе из турбины турбодетандерного агрегата.

тандерного агрегата с учетом выполнения баланса мощностей турбины и компрессора без использования процесса ручного подбора этих параметров, что демонстрирует преимущества представленного программного комплекса и позволяет экономить время на проведение расчетных исследований тепловых схем.

Список литературы

1. Калашников О. В., Иванов Ю. В., Будняк С. В. Вопросы адекватности теплофизической базы программных систем HYSYS, PRO-2 и ГАЗКОНДНЕФТЬ. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2000. № 1. С. 31–35.
2. Калашников О. В., Иванов Ю. В., Будняк С. В. Инженерные расчетные модели технологических сред нефтяных и газовых промыслов. 1. Фазовые равновесия углеводородов, воды, метанола и гликолей. *Экология и ресурсосбережение*. 1995. № 3. С. 25–29.
3. Что такое GIBBS [Электронный ресурс] / Официальный сайт GIBBS моделирование в газовой отрасли [2003-2018]. Режим доступа: <http://www.gibbsim.ru/node/10> (Дата обращения 01.02.2015).
4. Optimize Hydrocarbon Processes with Aspen HYSYS [Электронный ресурс] / Официальный сайт AspenTech [2005-2018]. Режим доступа: <https://www.aspentech.com/products/aspem-hysys.aspx> (Дата обращения 21.09.2015).
5. Лыхвар Н. В. Гибкие математические модели энергоустановок для оптимизации режимов ТЕЦ. *Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования*. Харьков: Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, 2003. Т. 2. С. 413–419.
6. Лыхвар Н. В., Говорущенко Ю. Н., Яковлев В. А. Моделирование теплоэнергетических установок с использованием интерактивной схемной графики. *Проблемы машиностроения*. 2003. № 1. С. 30–41.
7. Шубенко А. Л., Малащенко В. А., Сенецкий А. В., Бабак Н. Ю. *Когенерационные технологии в энергетике на основе применения паровых турбин малой мощности*. Харьков: НАН Украины, Институт проблем машиностроения, 2014. 320 с. ISBN 978-966-02-7059-6.
8. Фаловский В. И., Хорошев А. С., Шахов В. Г. Современный подход к моделированию фазовых превращений углеводородных систем с помощью уравнения состояния Пенга-Робинсона. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13, № 4. С. 120–125.
9. Варгафтик Н. Б. *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей*. Москва: Наука, 1972. 720 с.
10. Вукалович М. П., Ривкин С. Л., Александров А. А. *Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара*. Москва: Издательство стандартов, 1969. 408 с.
1. Kalashnikov O. V., Ivanov Yu. V., Budnyak S. V. (2000), "Voprosy adekvatnosti teplofizicheskoy bazy programmyh sistem HYSYS, PRO-2 i GAZKONDNEFT [The questions of the adequacy of the thermophysical basis of software systems HYSYS, PRO-2 and GAZKONDNEFT]", *Ekotekhnologii i resursosberezhenie*, No. 1, pp. 31–35.
2. Kalashnikov O. V., Ivanov Yu. V., Budnyak S. V. (1995), "Inzhenernye raschetnye modeli tekhnologicheskikh sred neftyanyh i gazovyh promyslov 1 Fazovye ravnovesiya uglevodorodov vo-dy metanola i glikolej [Engineering design models of technological environments of oil and gas fields. 1. Phase equilibriums of hydrocarbons, water, methanol and glycols]", *Ekologii i resursosberezhenie*. No. 3, pp. 25–29.
3. What is GIBBS. Official site GIBBS modeling in the gas industry [2003-2018]. <http://www.gibbsim.ru/node/10>. – 01.02.2018.
4. Optimize Hydrocarbon Processes with Aspen HYSYS Official site AspenTech [2005-2018]. <https://www.aspentech.com/products/aspem-hysys.aspx>. – 21.09.2015.
5. Lyhvar N. V. (2003), "Gibkie matematicheskie modeli energoustanovok dlya optimizatsii rezhimov TETS [Flexible mathematical models to optimize power plants CHP mode]", *Improving turbines by methods of mathematical and physical modeling: a collection of scientific papers.*, Vol. 2, pp. 413–419, A.N. Podgorny Institute For Mechanical Engineering Problems NAS of Ukraine, Kharkov.
6. Lyhvar N. V., Govoruschenko Yu. N., Yakovlev V. A. (2003), "Modelirovanie teploenergeticheskikh ustanovok s ispolzovaniem interaktivnoy shemnoy grafiki [Modeling of thermal power plants with the use of interactive graphics circuit]", *Mechanical Engineering Problems*, No. 1, pp. 30–41.
7. Shubenko O. L., Malyarenko V. A., Seneckij O. V., Babak N. Yu. (2014), *Kogeneracionnye tekhnologii v ehnergetike na osnove primeniya parovyh turbin maloy moshchnosti* [Cogeneration technologies in power engineering on the basis of application of steam turbines of low power], A.N. Podgorny Institute For Mechanical Engineering Problems NAS of Ukraine, Kharkov, 320 p. ISBN 978-966-02-7059-6.
8. Falovskij V. I., Horoshev A. S., Shahov V. G. (2011), "Sovremennyy podhod k modelirovaniyu fazovyh prevrashchenij uglevodorodnyh sistem s pomoshchyu uravneniya sostoyaniya Penga-Robinsona [A modern approach to modeling the phase transformations of hydrocarbon systems using the Peng-Robinson equation of state]", *Izvestiya of the Samara Scientific Center NAS of Russia*, Vol. 13, No. 4, pp. 120–125.
9. Vargaftik N. B. (1972), *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Handbook of thermophysical properties of gases and liquids], Nauka, Moscow, 720 p.
10. Vukalovich M. P., Rivkin S. L., Aleksandrov A. A. (1969), *Tablicy teplofizicheskikh svoystv vody i vodyanogo para* [Tables of thermophysical properties of water and steam], Publishing house of standards, Moscow, 408 p.

References (transliterated)

Поступила (received) 14.02.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шубенко Олександр Леонідович (Шубенко Александр Леонидович, Shubenko Oleksandr) – член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, завідуючий відділом оптимізації конструкцій та процесів турбомашин; вул. Пожарського 2/10, м. Харків, Україна, 61046; e-mail: shuben@ipmach.kharkov.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9014-1357>.

Сарапін Володимир Павлович (Сарапін Владимир Павлович, Sarapin Volodymyr) – кандидат технічних наук, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, науковий співробітник відділу оптимізації конструкцій та процесів турбомашин; вул. Пожарського 2/10, м. Харків, Україна, 61046; e-mail: sarapinv@ipmach.kharkov.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5323-5351>.