

УДК 62–623.1, 62–68, 661.91–404, 665.6/.7

## Рабочее тело цикла Ренкина для утилизации холода регазификации

А. Г. ФАЛЬМАН, falmalex@mail.ru

ООО «Криогенные газовые технологии»  
199106, г. Санкт-Петербург, 26 линия В. О., 15, корп. 2 лит. А

Д. Э. АГЕЙСКИЙ, ageiskiyd@gmail.com

Университет ИТМО  
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

*Произведен выбор рабочего тела установок утилизации холода регазификации жидких криопродуктов (на примере сжиженного природного газа (СПГ)). Был построен ряд моделей таких установок, отражающих их материально-энергетический баланс, что позволило проанализировать влияние свойств рабочего тела на показатели энергоэффективности таких установок. В числе целевых показателей энергоэффективности рассматривались эксергетический КПД, удельные затраты топлива и удельная дополнительная работа, общая энергоэффективность и др. Показано влияние отдельных свойств (плотности, показателя адиабаты, теплоемкости и т. п.) на целевые характеристики установки. Разработана компьютерная модель установки, реализующей цикл Ренкина с газовой турбиной, для анализа работы установки на различных рабочих телах. В качестве двух наиболее перспективных рабочих веществ предложены фтороформ (R23) и пропан.*

**Ключевые слова:** сжиженный природный газ, СПГ, регазификация, цикл Ренкина, эксергетический анализ, энергоэффективность, фтороформ, R23, пропан, рабочее тело.

### Информация о статье

Поступила в редакцию 19.02.2016, принята к печати 20.04.2016

doi: 10.21047/1606-4313-2016-15-2-71-75

### Ссылка для цитирования

Фальман А. Г., Агейский Д. Э. Рабочее тело цикла Ренкина для утилизации холода регазификации // Вестник Международной академии холода. 2016. № 2. С. 71–75.

## Rankine cycle working fluid for the use of regasification cold

A. G. FALMAN, falmalex@mail.ru

LLC "Cryogenic Gas Technologies"

199106, Russia, St. Petersburg, 26th line VO, 15

D. E. AGEYSKY, ageiskiyd@gmail.com

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

*LNG (liquid natural gas) regasification facilities are abundant in natural gas consuming countries. Energy efficiency enhancement of these facilities is a crucial task. Most of the previously built facilities do not use cold of LNG for by-production whereas there are several modern techniques allowing energy and some other by-products to be produced along with regasification. Organic Rankine cycle agent expansion can be used for energy production in a regasification unit. The article deals with different working fluids for such Rankine-based units and the impact of their properties on the unit energy efficiency characteristics (exergy efficiency, specific lost work, specific fuel consumption, overall energy efficiency etc.). For such units Fluoroform (R23) and propane are recommended.*

**Keywords:** liquid natural gas, LNG, regasification, Rankine cycle, exergy analysis, energy efficiency, fluoroform, R23, propane, working fluid.

Рынок сжиженного природного газа (СПГ) бурно развивается. По некоторым оценкам на данный момент в мире производится около 250 млн. т СПГ в год [1–3]. С эксергетической точки зрения СПГ содержит значительный потенциал, который можно преобразовать в полезную работу. Так, применение ряда комбинированных способов может позволить при регазификации этого ко-

личества СПГ получить в качестве побочных продуктов 58 тыс. ГВт·ч электроэнергии. Для сравнения, годовое энергопотребление Нью-Йорка с пригородами в 2010 г. составляет 60 тыс. ГВт·ч [4] или 28 млн. т жидкого азота с 14 млн. т жидкого кислорода.

Одними из наиболее многообещающих комбинированных способов являются способы с циклами Ренкина

[5–7] или Брайтона [8, 9]. Однако характеристики эффективности установок с этими циклами сильно зависят, в том числе, от свойств рабочего вещества или смеси рабочих веществ цикла (в том случае, если в установку включен замкнутый контур с вспомогательным теплоносителем). В связи с этим возникает необходимость подробного анализа влияния тех или иных характеристик рабочего тела на эффективность установки регазификации, позволяющего рекомендовать те или иные вещества [10, 11].

Данная работа посвящена рекомендациям по выбору рабочего тела для цикла Ренкина. При работе вспомогательного теплоносителя по этому циклу давление рабочего вещества увеличивается в насосе, затем оно нагревается и испаряется в испарителе, после чего направляется на турбину генератора. Вырабатываемая на турбине энергия обеспечивает затраты на работу насоса и выводится на электрогенератор.

Существуют способы передачи тепла выхлопных газов регазифицируемому СПГ за счет промежуточного теплоносителя (например, водо-гликолевой смеси), но эти методы ограничены температурой замерзания промежуточного теплоносителя. Вода может быть охлаждена только до 0 °С, водо-гликолевая смесь — не ниже –40 °С. Для того, чтобы не допустить замерзания промежуточного теплоносителя, его расход и расход воды нужно поддерживать на определенном уровне (довольно высоком), что требует дополнительных затрат энергии. Кроме того, вода должна быть перегрета, что также требует затрат и снижает эффективность.

Эти проблемы могут быть решены, если применить так называемый Органический цикл Ренкина (ORC). Основным отличием его является использование в качестве рабочего тела органического вещества или даже сжиженного газа. Многие такие органические жидкости при температурах нагревателя ниже 400 °С не требуют перегрева, что повышает эффективность цикла. Рабочие вещества органического цикла позволяют проводить охлаждение до температур ниже 0 °С, что означает, что к СПГ можно подвести большие количества теплоты при меньших расходах.

Одним из наиболее предпочтительных способов подведения теплоты к промежуточному теплоносителю является отдача ему теплоты выхлопных газов турбинного генератора. В таком генераторе сжигается часть газифицированного ПГ с выработкой дополнительной электроэнергии, а горячие выхлопные газы обеспечивают нагрев рабочего вещества.

Основные требования к рабочему веществу такого цикла — точка замерзания ниже температуры СПГ и возможность нагревать его до температур 450 °С при теплообмене с выхлопными газами и выше без термического разложения.

К самому рабочему телу предъявляются также следующие требования:

- низкая молекулярная масса (чем ниже, тем больше удельная выработка энергии при адиабатном расширении);

- высокая удельная теплота парообразования и удельная теплоемкость (большее количество подводимой к СПГ теплоты);

- высокая плотность (снижает объем рабочего вещества в системе);

- высокие значения отношения плотности к вязкости для всех фаз (обеспечивает большую эффективность теплообмена и меньшие размеры теплообменного оборудования);

- низкая токсичность и озоноразрушающий потенциал;

- низкая стоимость.

Кроме того, желательно, чтобы при нагреве рабочее вещество переходило в сверхкритическое состояние для упрощения конструкции испарителя.

В качестве рабочих веществ могут выступать различные вещества, в том числе пропан, изопентан, изобутан, галогениды метана, аммиак.

Наиболее удобным представляется пропан из-за своей низкой температуры замерзания, относительно небольшой молекулярной массы, озоноразрушающего потенциала, высокой термостойкости, низкой стоимости. Кроме того, в случае необходимости его можно легко перевозить в емкостях под давлением. Однако, он пожароопасен, что накладывает требования к высокой герметичности систем, в которых он используется.

Аммиак обладает низкой массой, высокой теплоемкостью и хорошим отношением плотности к вязкости, но он токсичен, а его температура замерзания выше температуры СПГ.

Фториды метана, например, фторид метана  $\text{CH}_3\text{F}$ , тетрафторид метана  $\text{CF}_4$  и дифторид метана  $\text{CH}_2\text{F}_2$  обладают хорошим соотношением плотности и вязкости и низкой температурой замерзания. Они нетоксичны, обладают низким потенциалом озонного разрушения. Однако у них низкие критические температуры (кроме  $\text{CH}_2\text{F}_2$ ), низкие теплоемкости, а  $\text{CH}_2\text{F}_2$  — пожароопасен. Все это ограничивает возможности и применения для данных задач.

Решением данной проблемы может быть использование фтороформа  $\text{CHF}_3$ . Его критическая температура около 30 °С, он может транспортироваться в сосудах под давлением и храниться летом под навесом при наличии водяного охлаждения. Он обладает низкой температурой замерзания (–155,2 °С), его молярная масса составляет 70 моль/г при 40 моль/г для пропана, у него хорошие значения отношения плотности к вязкости. Плотность его почти в два раза выше, чем у пропана. Фтороформ  $\text{CHF}_3$  также обладает более высокой термостойкостью, чем пропан, так что он может быть нагрет без разложения до температур порядка 1000 °С.

$\text{CHF}_3$  пожаробезопасен и нетоксичен и обладает нулевым ODP. У него есть всего два недостатка:

- теплоемкость ниже, чем у пропана, (61 ккал/кг при 97 ккал/кг для пропана);

- температура замерзания выше, чем у пропана (–155,2 °С для фтороформа и –187,6 °С для пропана).

Для моделирования органического цикла Ренкина (ORC) были выбраны два рабочих вещества — фтороформ и пропан. Были построены модели в системе точного моделирования Aspen Hysys (рисунок), различающиеся лишь рабочим веществом, но не компоновкой системы.

Модель включает в себя газовую турбину (на диаграмме модели — компрессор К-1 и детандеры К-2 и К-3). Отбросное тепло выхлопных газов утилизируется в двух теплообменниках пропана/фтороформа (E-103 и E-104). Теплообменник разбит на две части с целью исключения возможности образования льда. Температура выхлопных газов на выходе 35 °С, так что вода в нем при таких температурах конденсируется. Температура хладагента около –100 °С, так что возможно обмерзание его трубок снаружи.

Нагретый испарившийся хладагент подается на вход турбины (ТД-1) цикла Ренкина и затем, после выработки электроэнергии — на испарители E-101 и E-102 СПГ. Там пары конденсируются и охлаждаются, отдавая теплоту регазифицируемому ПГ. Процесс охлаждения разбит на две стадии: предохлаждение в E-101 и конденсация с переохлаждением в E-102. После этого хладагент нагнетается циркуляционным насосом (P-1) и вновь подается в нагреватели.

Для сравнения схем с пропаном и фтороформом рассматривались характеристики энергоэффективности установки, приведенные ниже. Методы эксергетического анализа, примененные для их расчета, рассматривались как зарубежными [12, 13], так и отечественными [14, 15] авторами.

Эксергетический КПД установки регазификации СПГ для способа с органическим циклом Ренкина и газовой турбиной рассчитывается следующим образом:

$$\eta_{ex} = \frac{E_{out}}{\Delta E_{ch}^B + \Delta E_{ch}^{RG}},$$

где  $E_{out}$  — суммарный выход электроэнергии с турбин генератора и контура цикла Ренкина за вычетом затрат на сжатие в насосе и компрессоре.

Величина дополнительных затрат энергии:

$$\Delta W = \Delta E_{ch}^B + \Delta E_{ch}^{RG} - E_{out},$$

где полезная работа горения топлива складывается из эксергий входящих (воздух и топливный газ) и выходящих (выхлопные газы и вода) из камеры горения турбины потоков.

Величина удельных дополнительных затрат  $\Delta W_m$  рассчитывается как отношение к массе выходящего из аппарата регазифицированного ПГ. Данная величина позволяет оценить количество энергии, которую можно попытаться использовать для превращения в работу:

$$\Delta W_m = \Delta W / m_{NG}.$$

Величина удельных затрат топлива (SFC) рассчитывается как отношение теплотворной способности топлива к массе продукта (ПГ).

Коэффициент использования энергии (PE) — отношение производимой энергии ( $E_{out}$ , кВт·ч) к высшей теплотворной способности топлива. Данная величина является характеристикой способов генерации или когенерации энергии. Отношение производимой энергии к массе продуктов (PP) позволяет сравнивать между собой способы с производством побочных продуктов (в данном случае, относят к массе ПГ).

Величина общей энергетической эффективности (ОЭЕ) рассчитывается как отношение суммы теплотвор-

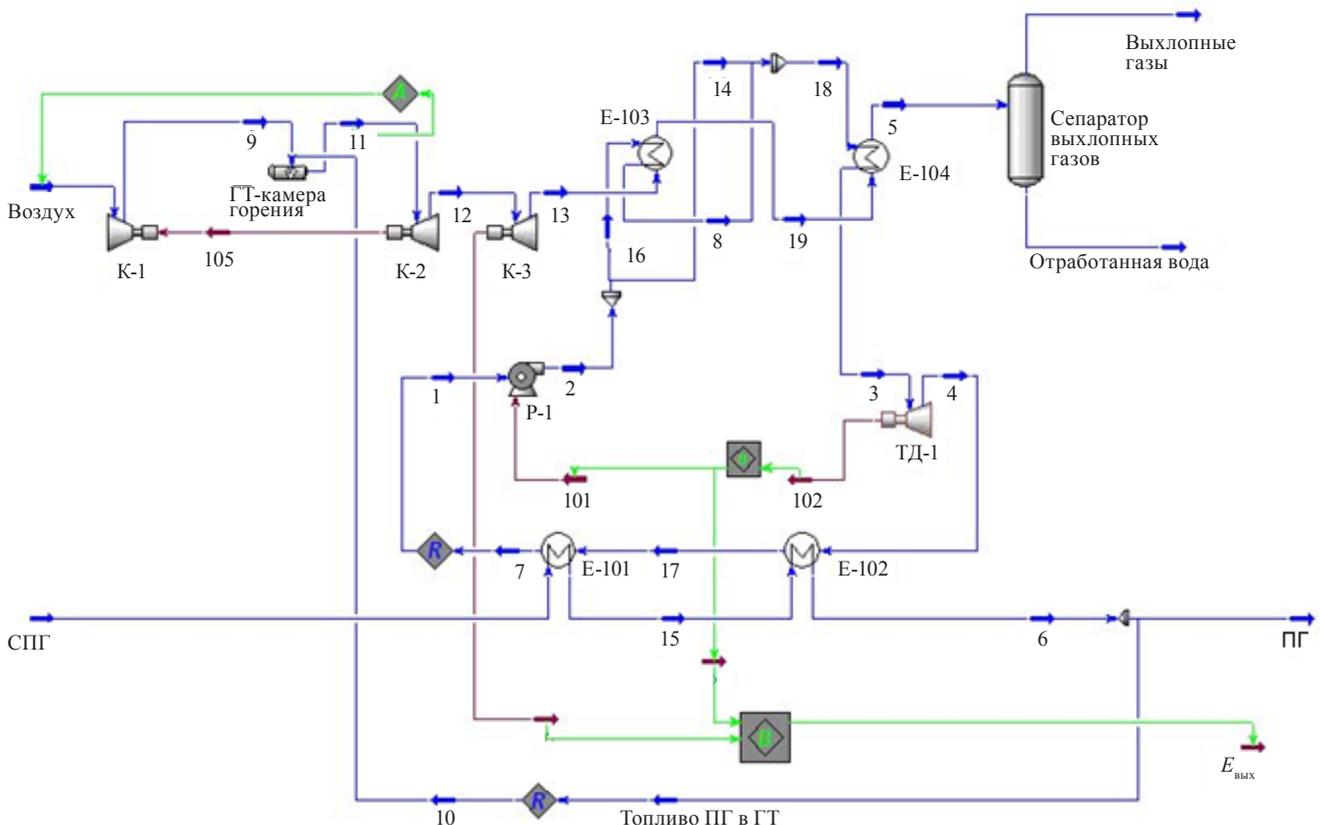


Схема комбинированного цикла с горячей турбиной и органическим циклом Ренкина (ORC+GT); эксергетический КПД 41,2%

ной способности продуктового потока и вырабатываемой электроэнергии к теплотворной способности потока СПГ. Данная величина применяется в газонефтяной промышленности, где зачастую и продукты, и сырье являются энергоносителями, а среди продуктов значатся как энергоносители, так и электроэнергия. Однако порой сырье из-за своих свойств (загрязнений и др.) не может быть продано как топливо. В таком случае оценивается отношение суммарного ННВ сырья и затрат электроэнергии  $E_{in}$  к сумме ННВ продуктов и вырабатываемой электроэнергии  $E_{out}$ .

Расчетные значения эксергетической эффективности  $\eta_{ex}$ , удельных дополнительных затрат энергии  $\Delta W_m$  и другие эксплуатационные характеристики приведены в таблице.

Сравнение параметров эффективности систем позволяет рассматривать фтороформ как более предпочтительный хладагент, по сравнению с пропаном. Так, например, необходимая для достижения рабочих давлений мощность циркуляционного насоса для фтороформового контура почти в два раза ниже пропанового.

Важной является также величина отношения плотности к динамической вязкости, характеризующая степень турбулизации потока при прочих равных условиях, и, как следствие — интенсивность теплообмена и необходимую площадь поверхности теплообменной аппаратуры. Чем выше это отношение, тем более компактные теплообменники могут быть применены в контуре вспомогательного теплоносителя.

Это отношение плотности к вязкости хладагента для фтороформа выше всего на 10%, а значение чисел Прандтля для пропана вовсе выше на 20–30%. Таким образом, можно сделать вывод, что теплообменная аппаратура для обоих рабочих веществ будет примерно одинаковой с небольшим преимуществом по компактности и эффективности для фтороформа. Использование фтороформа незначительно снизит затраты на оборудование (только за счет снижения мощности и стоимости циркуляционного насоса). Фтороформ дороже, но в отличие от пропана он непожароопасен, кроме того он более термостоек.

Таким образом, фтороформ обладает рядом преимуществ по сравнению с пропаном. Контур на фтороформе полнее использует энергию топлива, хоть и затраты топлива для него несколько выше, чем для пропана. Фтороформ обеспечивает установке более высокие значения эксергетического КПД. Использование фтороформа незначительно снизит затраты на оборудование (только за счет снижения мощности и стоимости циркуляционного насоса). Фтороформ дороже, но в отличие от пропана он непожароопасен, кроме того он более термостоек. Все это позволяет рекомендовать именно фтороформ в качестве рабочего тела установок регазификации, работающих по циклу Ренкина.

### Список литературы (References)

1. Выгон Г., Белова М. Развитие мирового рынка СПГ: вызовы и возможности для России. // Энергетический центр Московской школы управления Сколково. 2013. [Vygon G., Belova M. Development of the world market of LNG: calls and

### Параметры схемы с циклом Ренкина и газотурбинным генератором

Параметр	Пропан	Фтороформ
Эксергетический КПД $\eta_{ex}$	41,2%	47,8%
Дополнительные удельные затраты энергии $\Delta W_m$	252 кВт·ч/т	262 кВт·ч/т
Коэффициент использования энергии (PE)	45%	50%
Удельные затраты топлива (SFC)	392 кВт·ч/т	478 кВт·ч/т
Общая энергетическая эффективность (OEE)	97,5%	98,5%

opportunities for Russia. *Energetic center of Moscow School of Management Skolkovo*. 2013. (in Russian)]

2. IGU World LNG Report — 2013 Edition. *International Gas Union*. 2013
3. BP Energy outlook 2030. URL: <http://ebookbrowse.net/bp-energy-outlook-2030-summary-tables-xls-d69781265>.
5. How many wind turbines would it take to power all of New York City? *School of Engineering*. March 30, 2010. URL: <http://engineering.mit.edu/ask/how-many-wind-turbines-would-it-take-power-all-new-york-city>.
5. Патент № 1456688 СССР, МПК F17C9/02 Газификационная установка / С. И. Загривый. № 90686/23–26; заявл. 04.02.1989; опубл. 07.02.1989, Бюл. 5. [Patent No1456688 USSR, MPK F17S9/02 Gasification installation. S. I. Zagriyvi. (in Russian)]
6. Patent CN101238322 (B) КНР, МПК F01K25/00, F17C9/02, F17C9/04 Configurations and methods for power generation in LNG regasification terminals. Mak J.; Applicant and patent holder of Fluor Tech Corp. CN2006826102 20060717; published 14.11.2012.
7. Patent DE 10201056585 (A1) WIPO, МПК F17C9/02 Liquefied arrangement used as subsystem for increasing temperature of liquefied natural gas (LNG), has inlet for power plant process which is open, and output for LNG is connected to piping system representing flow from plant process. Dr Mosemann Dieter; Applicant and patent holder of Gea Batignolles Technologies Thermique — DE201010056585; published 06.06.2013.
8. Patent JP S5773299A WIPO, МПК F17C9/02 Gasification of liquefied natural gas. Asada Kazuhiko; Jinbou Atsushi; Tanigaki Yasuhiro; заявитель и патентообладатель Kobe Steel Ltd — JP19800149691 19801024.
9. Patent JPS5471422AWIPO, МПК F17C9/04 A method of recovering LNG gasifying power. Nagai Susumu; Asada Chiyuukei; Applicant and patent holder of Hitachi Shipbuilding Eng Co. JP19770138236 19771116.
10. Tarakad, R. R. 2000. LNG receiving and regasification terminals: an overview of design, operation and project development considerations. Houston TX, Zeus Development Corp.
11. Фальман А. Г., Агейский Д. Э. Перспективы регазификации СПГ. // Вестник международной академии холода. 2015. № 2. С. 46–49. [Falman A. G., Ageysky D. E. LNG regasification prospects. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2015. No 2. p. 46–49. (in Russian)]

12. Seider W. D., Seader J. D., Lewin D. K. Product and process design principles: Analysis, synthesis, and evaluation. 2nd ed. // Wiley, 2004.
13. Tarlowski, J., Sheffield, J. LNG import terminals — Recent Developments. *M. W. Kellogg Ltd.* UK. URL: [http://www.cheresources.com/lng\\_terminals.pdf](http://www.cheresources.com/lng_terminals.pdf)
14. Бродянский В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа. — М.: Энергия, 1973. 296 с. [Brodyanskii V. M. Exergic method of thermodynamic analysis. Moscow, Energiya, 1973. 296 p. (in Russian)]
15. Фальман А. Г., Агейский Д. Э. Эксергетический анализ способов регазификации СПГ. // Вестник международной академии холода. 2015. № 3. С. 34–38. [Falman A. G., Ageysky D. E. Exergetic analysis of LNG regasification techniques. *Vestnik mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2015. No 3. p. 46–49. (in Russian)]

## Памяти профессора В. Н. Филаткина



(14.07.1918–12.04.2016)

12 апреля 2016 г. ушел из жизни ветеран Великой Отечественной войны, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, почетный академик Международной академии холода, доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретические основы тепло- и хладотехники» Института холода и биотехнологий Университета ИТМО **ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ ФИЛАТКИН.**

Холодильщики России знают Филаткина В. Н. как ректора Ленинградского технологического института холодильной промышленности (ЛТИХП), десять лет (с 1960 по 1969 гг.) возглавлявшего этот легендарный в СССР вуз.

Вся профессиональная жизнь Владимира Николаевича связана с этим высшим учебным заведением. В институт Филаткин поступил в 1936 г., блестяще закончил его и через неделю с небольшим после получения диплома в июне 1941 г. добровольцем ушел на фронт. Закончилась война для Филаткина далеко на востоке, в Забайкалье. Вернулся в alma mater в 1946 г. и работал в родных стенах ассистентом, доцентом, возглавлял институт, свою родную кафедру «Теоретические основы тепло- и хладотехники» с 1981 по 1991 гг., где продолжал работать профессором до 2013 г.

Филаткин — один из самых известных ученых в области тепло- и массообмена, автор более 200 научных работ, учебников, монографий, учебных пособий, среди которых «Теоретические основы хладотехники. Термодинамика», «Теоретические основы хладотехники. Тепло-массообмен», «Вымораживающие и разделительные установки», «Тепломассоперенос и моделирование процессов и аппаратов систем кондиционирования воздуха», «Термодинамика растворов», «Теплопроводность и молекулярная диффузия» и др.

В последние годы Владимир Николаевич посвятил себя изданию серии удивительных книг — воспоминаний об отечественных холодильщиках XX века. Написаны книги о Г. Б. Чижове, Э. И. Гуйго, С. С. Будневиче, Н. А. Головкине, Е. С. Курылеве, Г. Н. Даниловой, Н. Н. Кошкине, О. П. Иванове, Ю. Н. Цветкове, Ю. П. Солнцева, М. К. Дорохине, И. А. Сакуне и других замечательных создателях холодильной техники, криогеники, пищевых технологий.

Многочисленны награды В. Н. Филаткина: четыре ордена Отечественной войны, два ордена Красного Знамени, ордена Красной Звезды и Трудового Красного Знамени, медали «За взятие Вены», «За взятие Будапешта», «За доблестный труд», «60 лет Победы в Великой Отечественной войне» и др.

Память о Владимире Николаевиче Филаткине навсегда сохранится в наших сердцах!

*Коллектив Института холода и биотехнологий Университета ИТМО, Президиум Международной академии холода и редакция журнала «Вестник МАХ» выражают искренние соболезнования родным и близким В. Н. Филаткина*

