

УДК 621.59

Выбор альтернативного криоагента для покрытия тепловой нагрузки в установке для общего криотерапевтического воздействия

Д-р техн. наук А. Ю. БАРАНОВ¹, А. В. ВАСИЛЕНКО², Е. В. СОКОЛОВА²,
С. Д. ЧУБОВА², А. М. ЗИЯВИДИНОВ²

¹Научно производственное предприятие «КРИОН»

²Университет ИТМО

E-mail: abaranov@itmo.ru

Общая криотерапия (WBC) — медицинская технология с широким спектром показаний к применению, в том числе, как средство реабилитации пациентов, переболевших COVID-19. Массовое применение технологии криотерапии для реабилитации требует больших затрат криоагента (жидкого азота). Наиболее успешным является использование установок, в которых для покрытия тепловой нагрузки используется привозной криоагент, жидкий азот или воздух. Из-за увеличения потребления кислорода в клиниках, занимающихся лечением COVID-19, снизилось производство жидкого азота и выросли цены на этот криопродукт. Ограниченный доступ жидкого азота препятствует широкому использованию WBC для реабилитации пациентов, переболевших COVID-19. Необходимы новые источники жидкого азота или альтернативный криоагент для обеспечения работы криотерапевтических установок. В условиях расширения потребления сжиженного природного газа (СПГ) рационально использовать теплоту регазификации этого криопродукта для реализации низкотемпературных технологий. Производство СПГ превышает 300 млн тонн в год. При этом СПГ используется только после перевода в газообразное состояние. Удельная теплота регазификации СПГ достигает 900 кДж/кг, это в 2 раза больше теплоты ожигения азота. Температура кипения СПГ при атмосферном давлении позволяет криостатировать устройства для WBC на оптимальном температурном уровне (130–140 К). Показано, что прямое использование СПГ в качестве криоагента возможно лишь в отдельных случаях. Для широкого использования теплоты регазификации целесообразно производить на месте подачи газа в распределительную сеть альтернативный криоагент, жидкий воздух или азот низкой чистоты. Этот криопродукт может быть использован в качестве криоагента на действующих установках общей криотерапии.

Ключевые слова: общая криотерапия, WBC, криоагент, сжиженный природный газ, СПГ, COVID-19, теплота регазификации.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 06.12.2021, принята к печати 25.01.2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-1-76-82

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Баранов А. Ю., Василенок А. В., Соколова Е. В., Чубова С. Д., Зиявидинов А. М. Выбор альтернативного криоагента для покрытия тепловой нагрузки в установке для общего криотерапевтического воздействия // Вестник Международной академии холода. 2022. № 1. С. 76–82. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-1-76-82

Selection of an alternative cryoagent to cover the thermal load in the WBC systems

D. Sc. A. Yu. BARANOV¹, A. V. VASILENOK², E. V. SOKOLOVA², S. D. CHUBOVA², A. M. ZIYAVIDINOV²

¹Scientific and production enterprise «KRION»

²ITMO University

E-mail: abaranov@itmo.ru

General cryotherapy (WBC) is a medical technology with a wide range of indications for use, including as a means of rehabilitation of patients who have had COVID-19. The mass application of cryotherapy technology for rehabilitation requires large amounts of cryoagent (liquid nitrogen). The most successful is the use of systems in which imported cryoagent, liquid nitrogen, or air is used to cover the thermal load. Due to the increase in oxygen consumption in clinics treating COVID-19, the production of liquid nitrogen has decreased and prices for this cryoproduct have increased. The limited availability of liquid nitrogen prevents the widespread use of WBC for the rehabilitation of patients who have had COVID-19. New sources of liquid nitrogen or an alternative cryoagent are needed to ensure the operation of cryotherapy

units. Under the conditions of expanding consumption of liquefied natural gas (LNG), it is rational to use the heat of regasification of this cryoproduct for the implementation of low-temperature technologies. LNG production exceeds 300 million tons per year. At the same time, LNG is used only after conversion to a gaseous state. The specific heat of LNG regasification reaches 900 kJ/kg, which is two times more than the heat of nitrogen liquefaction. The boiling point of LNG at atmospheric pressure allows cryostating devices for WBC at an optimal temperature level (130–140 K). It is shown that the direct use of LNG as a cryo-agent is possible, but only in some cases. For widespread use of the heat of regasification, it is advisable to produce a secondary cryoagent, liquid air or nitrogen of low purity at the place of gas supply to the distribution network. This cryoproduct can be used as a cryoagent for general cryotherapy units or for the implementation of other low-temperature technologies.

Keywords: general cryotherapy, WBC, cryoagent, liquefied natural gas, LNG, COVID-19, heat of regasification.

Article info:

Received 06/12/2021, accepted 25/01/2022

DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-1-76-82

Article in Russian

For citation:

Baranov A. Yu., Vasilenok A. V., Sokolova E. V., Chubova S. D., Ziyavidinov A. M. Selection of an alternative cryoagent to cover the thermal load in the WBC systems. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2022. No 1. p. 76–82. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-1-76-82

Введение

Пандемия COVID-19 затрагивает все большее количество населения. Заболевание протекает в крайне тяжелой форме, но еще большие проблемы возникают на этапе реабилитации пациента. У больных, перенесших заболевание COVID-19, побочные эффекты и осложнения, связанные с нарушениями в работе важнейших систем организма, могут проявляться в течение 6–8 месяцев. Опережающая массовая реабилитация лиц, перенесших заболевание COVID-19, приобретает важное социальное значение.

Процедуры общего криотерапевтического воздействия (WBC) являются наиболее эффективным средством реабилитации пациентов, перенесших COVID-19. WBC активирует «аварийный» сценарий самодиагностики и коррекции, при реализации которого, выявляются и устраняются все отклонения от физиологической нормы [1]. В ряде случаев коррекция нарушений может опережать проявление первых симптомов осложнений.

Установки для таких процедур свыше 20 лет используются в клиниках Российской Федерации, однако никогда потребность в этом виде медицинского оборудования не была настолько высока. Цикл реабилитации одного пациента состоит как минимум из 15 сеансов WBC [2]. С учетом массовости заболевания использование криотерапии, как средства реабилитации, потребует не только большого числа действующих установок, но и значительных затрат криоагента — жидкого азота.

В настоящее время на рынке медицинской техники предлагается 2 вида криотерапевтических установок — это аппараты с жидкостной азотной системой охлаждения (NCS) [2], в которой тепловая нагрузка покрывается за счёт теплоты образования жидкого азота, или многоместные криотерапевтические системы с компрессионной (безазотной) системой криостатирования (FNCS) [3].

Аппараты с FNCS не удовлетворяют технологическим требованиям, обеспечивающим высокую лечебную эффективность. Главным недостатком криотерапевтических установок с FNCS является высокий температурный уровень криостатирования зоны WBC (не ниже

160 K) [4]. В то время как исследования в области технологии общего криотерапевтического воздействия показали, что оптимальный температурный уровень криостатирования зоны WBC для многоместных установок составляет 130 K [5], а для установок индивидуального воздействия 140 K. Мощность привода действующей FNCS не соответствует интенсивности тепловой нагрузки.

Показано [2], что для многоместной криотерапевтической кабины необходима удельная электрическая мощность привода не менее 32 кВт/м³. При объеме кабины от 8 до 10 м³ расчетная мощность привода FNCS составит от 250 до 300 кВт, однако действующие аппараты такого типа имеют номинальную потребляемую мощность от 15 до 25 кВт [3]. При этом, цена такой установки составляет от 150000 €. Переход на более мощные виды FNCS и криостатирование зоны WBC на оптимальном температурном уровне значительно повысит стоимость подобных систем и затруднит их подключение к электросетям медицинских учреждений [6, 7].

Криотерапевтические установки с азотным охлаждением

Использование для покрытия тепловой нагрузки жидкого азота (LN) значительно снижает себестоимость оборудования для WBC и их размещение в медицинских учреждениях [8, 9]. Особенно успешна практика применения одноместных WBS систем (криосаун), которые составляют более 90% парка криотерапевтических систем (WBCS) Российской Федерации. Но, применительно к задачам кампании по массовой реабилитации пациентов, перенесших COVID-19, возможности одноместных WBCS ограничены. Одноместная установка позволяет провести не более 100 WBC процедур в день. В то время как многоместные WBCS с азотным охлаждением пропускают до 1000 человек в сутки [9].

Однако, многоместные аппараты с NCS также не поддерживают в зоне WBC оптимальный уровень температуры (130 K). Исследования, выполненные в таких WBCS, проводятся при температуре 150 K [10]. В многоместных

WBCS жидкого азота должны быть не менее 3,2 кг/м³ за процедуру. С учетом указанного выше объема процедурной кабины (8–10 м³) и частоты проведения процедур (15 процедур в час), номинальные затраты жидкого азота оцениваются в 300–400 кг/ч [2]. Производители многоместных установок с NCS утверждают, что расход жидкого азота не превышает 100 кг/час [9]. Из-за недостаточной энерговооруженности NCS поддерживают температуру на уровне 150 К только при минимальном уровне тепловой нагрузки. В момент перехода пациентов в основную процедурную кабину, когда подвод теплоты возрастает в 10 раз, температура в зоне WBC увеличивается на 50–60 К [3]. Следует отметить, что в конце XX века, когда многоместные установки с NCS только начали применять в клинической практике, температура в зоне WBC поддерживалась на уровне 110 К [2]. Постепенное повышение температуры мотивировалось стремлением снизить расход жидкого азота.

Рассматривать многоместные WBCS, как основное средство пациентов, перенесших COVID-19, можно только в случае приведения их температурного режима и энерговооруженности в соответствие с требованиями технологии WBC [10]. Для этого потребуется существенно увеличить затраты жидкого азота на проведение процедур. Затраты криоагента на реализацию WBC для одного пациента должны быть не менее в 5 кг [11, 12, 13]. Массовое применение технологии WBC в целях реабилитации возможно только в условиях доступности жидкого азота [14].

Доступность и цена жидкого азота

В 2021 г. ощущается очевидный недостаток рыночного предложения жидкого азота. Это уже создало трудности потребителям и привело к повышению цен на этот криопродукт. В некоторых регионах Российской Федерации стоимость килограмма жидкого азота выросла в 1,5–2 раза и тенденции дальнейшего роста сохраняется.

Одним из побочных эффектов пандемии COVID-19 стало увеличение спроса на медицинский кислород. К снабжению клиник этим криопродуктом привлекают даже подразделения министерства обороны России. Большое число воздуходелительных установок переведено в режим получения кислорода, из-за этого существенно уменьшилось производство жидкого азота. Аналогичная ситуация наблюдается и в Западной Европе, поэтому прекратились поставки жидкого азота от зарубежных производителей.

Обеспечение WBCS жидким азотом и ранее представляло определенную технико-экономическую проблему в отдельных регионах России и мира. В Российской Федерации существуют регионы, в которых отсутствуют производители жидкого азота, поэтому цены на этот криопродукт превышают средние в 3–4 раза. В странах Латинской Америки локальные цены на жидкий азот в 10 раз превышают средний рыночный уровень.

Есть все основания для поиска альтернативного криоагента пригодного для покрытия тепловой нагрузки WBCS.

Сжиженный природный газ — альтернативный криоагент для покрытия тепловой нагрузки в WBCS

Сжиженный природный газ (СПГ) все шире используется в промышленности и коммунальном хозяйстве. Особенно велики темпы роста использования СПГ в странах Западной Европы [15]. Учитывая то, что температура криостатирования зоны WBC составляет 130–140 К СПГ, температура парообразования которого при атмосферном давлении составляет 111 К, в первом приближении, подходит криостатирования процедурной кабины WBCS (табл. 1). Сравнение СПГ с жидким азотом (LN) позволяет сделать вывод о том, что использование СПГ в качестве альтернативного криоагента позволит снизить действительные затраты энергии на реализацию технологии WBC, так как температура кипения этого криоагента на 33 К ближе к температуре криостатирования зоны WBC. При использовании жидкого азота тепловая нагрузка, выделенная на температурном уровне 140 К отводится, криоагентом, температура кипения которого на 60 К ниже, из-за этого действительные затраты энергии в три раза превышают теоретически возможные затраты [2]. Использование сжиженного природного газа в качестве криоагента может быть реализовано без дополнительных финансовых затрат. СПГ интересует потребителей только в качестве источника тепловой энергии, поэтому перед использованием и транспортированием по трубопроводам его переводят в газообразное состояние, т. е. регазифицируют [15].

Для процесса регазификации необходимо подвести к единице массы СПГ до 900 кДж/кг тепловой энергии. При регазификации больших объемов СПГ поиск источников теплоты является серьезной технической проблемой [16]. На СПГ терминалах для испарения СПГ используют теплоту от морской воды, а при регазификации небольших объемов используют атмосферные испарители. Разрабатываются проекты использования теплоты регазификации СПГ для выработки электроэнергии, однако такие системы возвращают не более 10% энергии, затраченной при ожигении. С учетом этих обстоятельств прямое использование теплоотводящей способности СПГ представляет наиболее рациональным способом перевода этого криопродукта в газообразное состояние. Учитывая то, что криопродукт после регазификации может быть использован по прямому назначению, затрат на его приобретение не потребуется.

Таблица 1

Характеристики жидкого азота (LN) и сжиженного природного газа при атмосферном давлении

Table 1

Characteristics of liquid nitrogen (LN) and liquefied natural gas at atmospheric pressure

Характеристики	Криоагент	
	LN	LNG
Температура кипения, К	78	111
Теплота парообразования, Дж/кг	199	480
Плотность криоагента кг/м ³	802	450

Объемы производства СПГ несопоставимы с выработкой жидкого азота. Уже сегодня в России производится свыше 25 млн тонн СПГ в год, а мировое производство СПГ превышает 300 млн тонн.

Многоместные WBCS установки с жидкостной системой охлаждения рассчитаны на рекуперативный отвод теплоты из зоны WBC [3]. Это исключает попадание паров криоагента в процедурный объем и в качестве криоагента может быть использована любая криогенная жидкость, которая соответствует технологии WBC по температуре кипения. В частности, температура кипения альтернативного криоагента должна быть как минимум на 20 К ниже оптимальной температуры криостатирования зоны WBC, которая составляет 140 К [2, 3]

При атмосферном давлении температура кипения сжиженного природного газа составляет 111 К, что в принципе позволяет поддерживать в низкотемпературной кабине температуру на уровне 140 К.

Сетевое потребление СПГ

Техническая проблема реализации технологии WBC с использованием сжиженного природного газа в качестве альтернативного криоагента связана с тем, что при регазификации необходимо повысить давление потока энергоносителя до уровня, соответствующего требованиям приемной сети (рис. 1). Система газоснабжения частного дома работает при избыточном давлении не более 0,001 МПа. В заводских газовых сетях, от которых питаются котельные установки, поддерживается давление 0,2 МПа. В городской газораспределительной сети давление природного газа составляет до 1,0 МПа. В магистральных трубопроводах поддерживается давление до 7,0 МПа. Наибольшее давление регазификации СПГ достигается на автомобильных газонаполнительных станциях (АГНЗС), где природный газ поступает в накопители с рабочим давлением до 25 МПа.

Основное количество теплоты поглощается при изменении агрегатного состояния криоагента. Давление регазификации определяет температуру фазового перехода и уровень, на котором можно использовать теплоту парообразования. В большинстве случаев СПГ хранится

при давлении, близком к атмосферному, и находится в насыщенном состоянии [16]:

$$T_1 = T_1' = f(P_1); h_1' = f(P_1); h_1 = h_1' = f(P_1).$$

Насос повышает давление потока жидкости практически без изменения температуры и теплосодержания:

$$T_2 \approx T_1 = T_1' = f(P_1); h_1 \approx h_1 = h_1' = f(P_1).$$

Повышение давления повышает значение температуры насыщения:

$$P_2 > P_1; T_2' = f(P_2); T_2 < T_2',$$

поэтому на выходе из жидкостного насоса 2 криоагент будет находиться в недогретом состоянии:

$$T_2 < T_2'; h_2 < h_2'.$$

На этапе перегрева жидкости до насыщенного пара подводимая теплота поглощается за счет теплоемкости жидкости:

$$q'_{неп} = h_2' - h_2 = h_2' - h_1.$$

Переход СПГ из состояния насыщенной жидкости в насыщенный пар происходит при постоянном давлении, но переменной температуре. Разность температуры насыщенного пара и насыщенной жидкости возрастает по мере роста давления.

На рис. 2 представлены зависимости $h_i = f(T_i)$ (при $P = \text{const}$) при регазификации в газовые сети с разным рабочим давлением. Видно, что для прямого использования в качестве криоагента WBCS пригоден только СПГ, который подается в сеть с давлением близким к атмосферному.

Следует отметить, что частные газовые сети представляют наименьший интерес с точки зрения использования теплоты регазификации на вторичные цели, так как суточное потребление газа в таких сетях не превышает 20 кг в сутки.

Самый большой расход СПГ наблюдается в сетях магистральных трубопроводов, где давление газа достигает 7,0 МПа. Однако при таком высоком давлении, переход из жидкого состояния в газообразное (см. рис. 2)

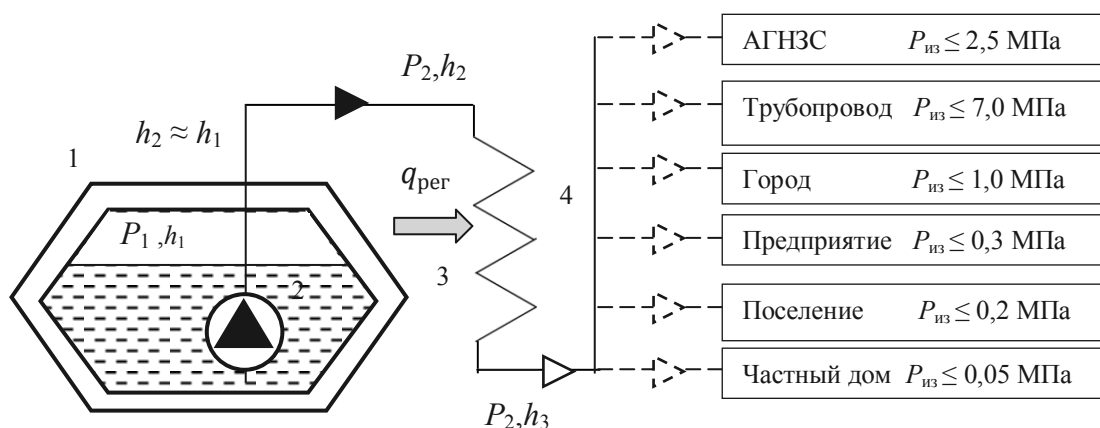


Рис. 1. Варианты использования сжиженного природного газа после регазификации: 1 — криогенная емкость с СПГ; 2 — погружной насос высокого давления; 3 — теплообменник-регазификатор; 4 — приемная сеть

Fig. 1. Options for using liquefied natural gas after regasification: 1 — cryogenic LNG tank; 2 — high-pressure submersible pump; 3 — heat exchanger-regasifier; 4 — receiving network

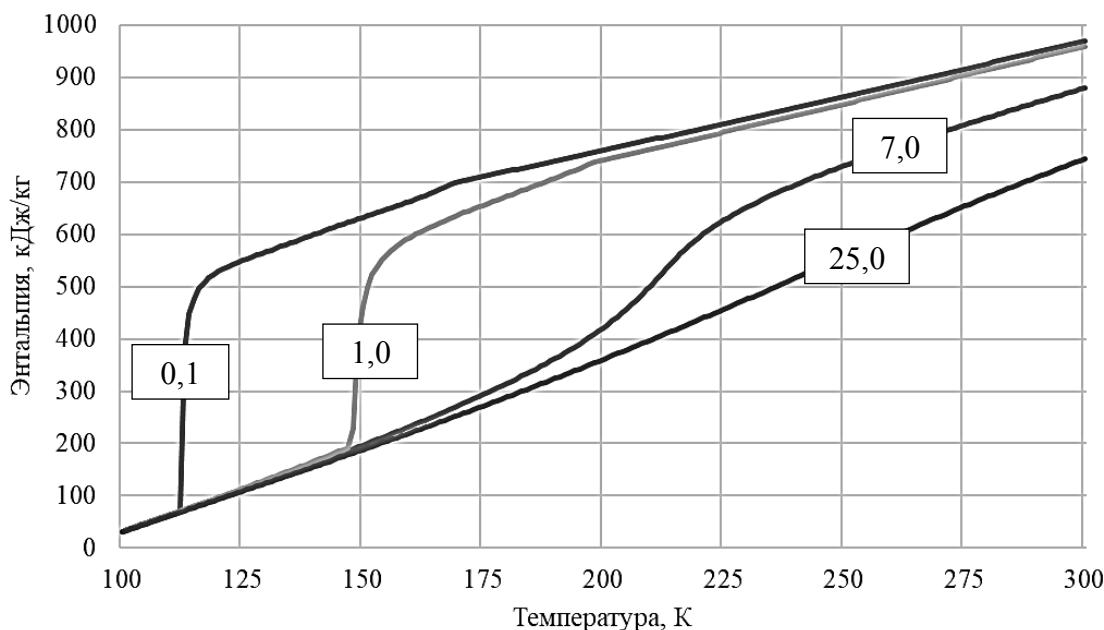


Рис. 2. Изменение энтальпии жидкого природного газа в процессе регазификации при различных значениях давления [МПа] в приемной газовой сети

Fig. 2. Change in the enthalpy of liquid natural gas during regasification at different pressure values [MPa] in the receiving gas network

начинается при температуре 185 К, а завершается при температуре 285 К. В сетях АГНЗС график изменения энтальпии потока не имеет выраженной области фазового перехода.

Использование сжиженного природного газа для покрытия тепловой нагрузки установки WBC возможно только при использовании дополнительного цикла трансформации тепловой энергии.

Процесс регазификации СПГ может выполнять функцию внешней ступени охлаждения для цикла криостатирования зоны WBC. В качестве такого цикла можно использовать относительно простые технологические решения, например, дроссельный цикл высокого давления или детандерный газовый цикл низкого давления.

Следует учесть, что процессы регазификации СПГ и WBC достаточно трудно синхронизировать. Промышленная регазификация осуществляется непрерывно, а WBCS не эксплуатируются в ночное время. Не менее проблематичен доступ большого числа пациентов в промышленные зоны, где осуществляется регазификация СПГ. Следует разработать варианты демпфирования тепловой нагрузки на систему охлаждения зоны WBC для максимального использования теплоотводящей способности регазифируемого природного газа.

Производство альтернативного криоагента при регазификации СПГ

Простейшим демпфером тепловой нагрузки на систему охлаждения зоны WBC представляется цикл альтернативного криоагента за счёт использования теплоты регазификации сжиженного природного газа. Таким криоагентом для WBCS может быть жидкий азот или жидкий воздух [3]. Накопление альтернативного криоагента можно осуществлять непрерывно, изменяя подачу газа на ожижение, в зависимости от количества регази-

фицируемого СПГ. Полученный криоагент можно накапливать и перевозить в места размещения установок для WBC. Устройства для накопления альтернативного криоагента, жидкого воздуха, использовались в WBCS [2]. Криогенный ожижитель вырабатывал и накапливал жидкий воздух круглосуточно. Накопленный криоагент расходовался в период проведения процедур WBC. Накопления жидкого криоагента позволяло равномерно распределить энергетические затраты по времени и использовать дешёвую «ночную» электроэнергию.

В случае получения альтернативного криоагента за счёт теплоты регазификации СПГ, появляется возможность использовать альтернативный криоагент на большом удалении от места его производства.

Использование жидкого воздуха в качестве альтернативного криоагента

WBCS могут использовать в качестве альтернативного криоагента, как жидкий азот, так и жидкий воздух. Однако, получение жидкого воздуха гораздо проще, так как не требует разделения атмосферного воздуха на компоненты. Ранее жидкий воздух широко использовали в многоместных криотерапевтических кабинках и криобассейнах [2].

В многоместных установках для WBC пары жидкого воздуха направляли в процедурную кабину. Это значительно улучшало показатели энергоэффективности системы охлаждения, так как наряду с теплотой парообразования воздуха (200 кДж/кг) для покрытия тепловой нагрузки использовалась теплота перегрева паров криоагента от температуры кипения до температуры криостатирования (60 кДж/кг). Считается, что одноместные установки криосауны рассчитаны на использование жидкого азота [14], но на самом деле никаких ограничений для замены криоагента не существует, так как криоагент

используется только для поглощения теплоты, выделяемой в зоне WBC.

Закключение

Использование теплоты регазификации СПГ для получения жидкого воздуха, позволит обеспечить действующие установки для WBC доступным по цене альтернативным криоагентом. Это расширит доступ насе-

ления к процедурам WBC и обеспечит успешную реабилитацию лиц, перенесших COVID-19.

Учитывая масштабы производства СПГ, получение жидкого воздуха за счет утилизации теплоты регазификации позволит создать условия для развития широкого спектра прикладных криогенных технологий, в которых жидкий воздух будет использоваться в качестве дешевого криоагента.

Литература

1. Bouzigon R., Dupuy O., Tiemessen I., De Nardi M., Bernard JP, et al. Cryostimulation for post-exercise recovery in athletes: a consensus and position paper // *Frontiers in Sports and Active Living*. 2021. Vol. 3. P. 1–14.
2. Баранов А. Ю. Низкотемпературные установки медицинского назначения. Ч. 1. Аппараты для общего криотерапевтического воздействия: учеб. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 178 с.
3. Vasilenok A. V., Baranov A. Y., Malysheva T. A., Filatova O. A., Kutyanova L. R., Andreev A. M., Solonina Y. A. The cost of liquid nitrogen for WBC sessions // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 826. No. 1. P. 1–6.
4. Elnaggar M., Alnahhal M., Sultan M., Niaz H., Miyazaki T., et al. Low-temperature Technologies. Ch 8. Technique and Technology of Whole-Body Cryotherapy (WBC), IET — 2020.
5. Yerezhpe D., Baranov A. Y. Understanding Cryotherapy, IET-2020.
6. Baranov A. Y., Shestakova O. A., Malysheva T. A., Vasilenok A. V., Malinina O. S. The physical theory of efficiency and safety of the WBC // *Refrigeration Science and Technology*. 2018. Vol. 3. P. 49–55.
7. Ережеп Д., Баранов А. Ю. Анализ влияния одежды в процедуре криотерапии с использованием компьютерного моделирования // *Вестник Международной академии холода*. 2019. № 4. С. 84–91.
8. Zalewski P., Klawe J. J., Pawlak J., et al. Thermal and hemodynamic response to whole-body cryostimulation in healthy subjects // *Cryobiology*. 2013. Vol. 66. No. 3. P. 295–302.
9. Cuttell S., Hammond L., Langdon D., Costello J. Individualising the exposure of –110 °C whole body cryotherapy: the effects of sex and body composition // *Journal of Thermal Biology*. 2017. Vol. 65. P. 41–47.
10. Kolishkin L. M., Shakurov A. V. Heat transfer between human and fluid under extreme conditions of partial body cryotherapy // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. P. 1–7.
11. Baranov A. Yu., Filatova O. A., Vasilenok A. V., Safonov A. V., Sokolova E. V. Energy requirements for nitrogen cooling systems of WBC units. // *Вестник Международной академии холода*. 2019. № 1. С. 92–97.
12. Yerezhpe D., Baranov A. Y., Pakhomov O. V. Mathematical modeling non-stationary heat exchange of object whole-body cryotherapy // *2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2019. P. 31–35.
13. Yerezhpe D., Baranov A. Y., Pakhomov O. V. Analysis of effect of clothing in procedure of cryotherapy using computer simulation // *2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2019. No. 4. P. 84–91.
14. Baranov A. Y., Panova D. E., Sokolova E. V., Tatarenko I. V., Emelianov A. L. Supplying with LN of IWBC plants // *Refrigeration Science and Technology*. 2018. Vol. 3. P. 10–24.

References

1. Bouzigon R., Dupuy O., Tiemessen I., De Nardi M., Bernard JP, et al. Cryostimulation for post-exercise recovery in athletes: a consensus and position paper. *Frontiers in Sports and Active Living*. 2021. Vol. 3. P. 1–14.
2. Baranov A. Yu. Low-temperature medical installations. Part 1. Devices for general cryotherapeutic effects: textbook. St. Petersburg: ITMO University, 2016. 178 p. (in Russian)
3. Vasilenok A. V., Baranov A. Y., Malysheva T. A., Filatova O. A., Kutyanova L. R., Andreev A. M., Solonina Y. A. The cost of liquid nitrogen for WBC sessions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 826. No. 1. P. 1–6.
4. Elnaggar M., Alnahhal M., Sultan M., Niaz H., Miyazaki T., et al. Low-temperature Technologies. Ch 8. Technique and Technology of Whole-Body Cryotherapy (WBC), IET — 2020.
5. Yerezhpe D., Baranov A. Y. Understanding Cryotherapy, IET — 2020.
6. Baranov A. Y., Shestakova O. A., Malysheva T. A., Vasilenok A. V., Malinina O. S. The physical theory of efficiency and safety of the WBC. *Refrigeration Science and Technology*. 2018. Vol. 3. P. 49–55.
7. Yerezhpe D., Baranov A. Yu. Analysis of the clothing effect in the procedure of cryotherapy using computer simulation. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2019. No 4. p. 84–91. (in Russian)
8. Zalewski P., Klawe J. J., Pawlak J., et al. Thermal and hemodynamic response to whole-body cryostimulation in healthy subjects. *Cryobiology*. 2013. Vol. 66. No. 3. P. 295–302.
9. Cuttell S., Hammond L., Langdon D., Costello J. Individualising the exposure of — 110 °C whole body cryotherapy: the effects of sex and body composition. *Journal of Thermal Biology*. 2017. Vol. 65. P. 41–47.
10. Kolishkin L. M., Shakurov A. V. Heat transfer between human and fluid under extreme conditions of partial body cryotherapy. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. P. 1–7.
11. Baranov A. I., Filatova O. A., Vasilenok A. V., Safonov A. V., Sokolova E. V. Energy requirements for nitrogen cooling systems of WBC units. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2019. No. 1 (70). P. 92–97.
12. Yerezhpe D., Baranov A. Y., Pakhomov O. V. Mathematical Modeling Non-Stationary Heat Exchange of Object Whole-Body Cryotherapy. *2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2019. P. 31–35.
13. Yerezhpe D., Baranov A. Y., Pakhomov O. V. Analysis of Effect of Clothing in Procedure of Cryotherapy using Computer Simulation. *2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2019. No. 4, P. 84–91.
14. Baranov A. Y., Panova D. E., Sokolova E. V., Tatarenko I. V., Emelianov A. L. Supplying with LN of IWBC plants. *Refrigeration Science and Technology*. 2018. Vol. 3, P. 10–24.

15. Баранов А. Ю., Валентинова К. А., Иванов Л. В. Моделирование испарения сжиженного природного газа в мобильных резервуарах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 4 (128). С. 595–602.
16. Середенко Е. С., Пахомов О. В., Баранов А. Ю. Математическая модель испарения сжиженного природного газа и анализ влияния исходного состава на скорость испарения. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. N 4 (128). С. 603–610.
15. Baranov A. Yu., K. Valentinova. A., Ivanov L. V. Modeling of evaporation of liquefied natural gas in mobile reservoirs. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2020. Vol. 20. No. 4 (128). pp. 595–602. (in Russian)
16. Seredenko E. S., Pakhomov O. V., Baranov A. Yu. Mathematical model of evaporation of liquefied natural gas and analysis of the effect of the initial composition on the evaporation rate. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2020. Vol. 20. No. 4 (128). pp. 603–610. (in Russian)

Сведения об авторах

Баранов Александр Юрьевич

Д. т. н. профессор, руководитель департамента научных исследований ООО «Научно-производственное предприятие «КРИОН» 197375, Санкт-Петербург, Макулатурный проезд, 4, литер А, abaranov@itmo.ru

Василенок Анна Владимировна

Преподаватель, аспирант факультета энергетики и экотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, vasilenok_anna@itmo.ru

Соколова Екатерина Владимировна

Старший преподаватель факультета энергетики и экотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, evlogvinenko@itmo.ru

Чубова Софья Дмитриевна

Магистрант факультета энергетики и экотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, chubova_sofi@mail.ru

Зиявидинов Анвар Махмудович

Магистрант факультета энергетики и экотехнологий Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, shev. al28@yandex.ru

Information about authors

Baranov Aleksandr Yu.

D. Sc., Professor, Head of R&D department of LLC «Research and Production Enterprise «KRION», Russia, 197375, Saint Petersburg, Makulaturnyi passage, 4A, abaranov@itmo.ru

Vasilenok Anna V.

Lecturer, Postgraduate student of the Faculty of Energy and Ecotechnology, ITMO University, 9 Lomonosov str., St. Petersburg, 191002, Russia, vasilenok_anna@itmo.ru

Sokolova Ekaterina V.

Senior Lecturer at the Faculty of Energy and Ecotechnologies of ITMO University, 9 Lomonosov str., St. Petersburg, 191002, Russia, evlogvinenko@itmo.ru

Chubova Sofia D.

Master's student of the Faculty of Energy and Ecotechnologies of ITMO University, 9 Lomonosov str., St. Petersburg, 191002, Russia, chubova_sofi@mail.ru

Ziyavidinov Anvar M.

Master's student of the Faculty of Energy and Ecotechnologies of ITMO University, 9 Lomonosov str., St. Petersburg, 191002, Russia, shev. al28@yandex.ru

О Перечне рецензируемых научных изданий

Департамент аттестации научных и научно-педагогических работников Минобрнауки России информирует.

В связи с вступлением в силу новой редакции номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118, издано распоряжение Минобрнауки России от 1 февраля 2022 г. № 33-р о Перечне рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Рецензируемые научные издания, ранее включенные в Перечень по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки, которые были изменены или исключены из ранее действующей номенклатуры научных специальностей, считаются включенными в Перечень по этим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки до 16 октября 2022 г.

Подробная информация на сайте ВАК РФ в разделе "Документы" – "Рецензируемые издания"
https://vak.minobrnauki.gov.ru/documents#tab=_tab:editions~