Система электрогенерации на спутнике Сатурна Титане, использующая геотермальную энергию



103

В.А. Воронов, А.А. Жаров, К.А. Апсит

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (научно-исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В связи с тем, что спутник Сатурна Титан представляет особый интерес для исследования, для планирования будущих миссий необходимо рассмотреть вопрос выработки электроэнергии на поверхности этого спутника. В статье показано, что одним из наиболее перспективных методов получения электроэнергии в данном случае является использование геотермальных источников.

Цель работы – поиск наилучшего способа использования геотермальной энергии на спутнике Сатурна Титане. **Методы.** Для достижения поставленной цели были рассмотрены энергетические установки, работающие по следующим циклам: докритический цикла Ренкина, закритический цикла Ренкина, двухкаскадный цикла Ренкина, цикл Брайтона. В качестве возможных рабочих тел в указанных циклах рассматривались, предпочтительно, те, которые содержатся в атмосфере спутника для уменьшения количества доставляемых с Земли материалов. Были рассчитаны значения КПД силового цикла для различных рабочих тел, значений перегрева пара перед турбиной и давлений. Произведено сравнение максимально возможного КПД для каждого цикла при прочих равных условиях. **Результаты.** В целом, расчёт показал, что все рассматриваемые циклы работоспособны при заданных условиях. Один из основных результатов, полученных в ходе исследования, – простой докритический цикл Ренкина обладает наибольшим КПД в данных условиях (в качестве рабочего тела используется метан).

Ключевые слова: цикл Ренкина; цикл Брайтона; органический цикл Ренкина; геотермальная энергия.

Как цитировать:

Воронов В.А., Жаров А.А., Апсит К.А. Система электрогенерации на спутнике Сатурна Титане, использующая геотермальную энергию // Холодильная техника. 2021. Т. 110, № 2. С. 103–112. DOI: https://doi.org/10.17816/RF322837



ЭКО • ВЕКТОР

104

Power generation system on Saturn's Titan moon using geothermal energy

Vladimir A. Voronov, Anton A. Zharov, Konstantin A. Apsit

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Because Saturn's satellite, Titan, is of particular research interest with respect to planning future missions, considering the issue of power generation on the surface of Titan is necessary. This study shows that the use of geothermal sources is one of the most promising methods of generating electricity on Titan.

AIM: The purpose of the study is to explore the best way to utilize geothermal energy from the surface of Titan.

METHODS: Therefore, energy installations operating according to the precritical Rankine, postcritical Rankine, two-cascade Rankine, and Brighton cycles were investigated in this study. The selection of working fluids for these cycles would be based on the fluids present in the atmosphere of Titan to reduce the amount of materials transported from Earth. The power cycle efficiencies for different working fluids, degree of preturbine steam superheating, and pressures were calculated to enable the comparison of the maximum possible efficiency for each cycle under conditions equivalent to those on Titan.

RESULTS: In general, the calculations herein revealed that all cycles under consideration are feasible under the given conditions. Notably, a simple precritical Rankine cycle with methane as the working fluid exhibits the highest efficiency under the given conditions.

Keywords: Rankine cycle; Brayton cycle; organic Rankine cycle (ORC); geothermal energy.

To cite this article:

Voronov VA, Zharov AA, Apsit KA. Power generation system on Saturn's Titan moon using geothermal energy. *Refrigeration Technology*. 2021;110(2): 103–112. DOI: https://doi.org/10.17816/RF322837

Холодильная техника

105

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проводится активное обсуждение и планирование создания баз для пребывания людей на планетах и спутниках солнечной системы. Например, имитации экспедиций, проводимые Роскосмосом Марс-500, Луна-2015.

Спутник Сатурна Титан представляет особый интерес для изучения и возможной колонизации. Во-первых, его атмосфера также, как и земная, состоит по большей части из азота (~95%), и имеет близкое к земной давление ~ 150 кПа [1, 2]. Во-вторых, обилие воды и органических веществ на поверхности позволит полезно их использовать для получения кислорода и высокомолекулярных соединений [3]. В-третьих, относительно низкое ускорение свободного падения у поверхности (1,352 м/с²) даст возможность без особых затруднений запускать космические аппараты с поверхности спутника. В-четвёртых, Титан является геологически активным, что открывает перспективы для использования геотермальной энергии. Таким образом, условия для жизнедеятельности человека, несмотря на крайне низкую температуру у поверхности (~97 К), являются наиболее благоприятными среди тел Солнечной системы, исключая Землю.

Одной из существенных проблем создания базы на Титане является получение электроэнергии. Наиболее простой способ — применение фотоэлектрических преобразователей для использования солнечной энергии. Однако, если рассматривать солнечную постоянную (максимальная мощность солнечного излучения на 1 м²), то можно увидеть, что на орбите Сатурна она составляет 15 Вт/м², в то время, как на земной орбите её величина — 1353 Вт/м². Таким образом, Титан получает лишь 1,1% мощности солнечного излучения от земной, что исключает применение данного источника энергии [4].

Другим источником энергии, который можно использовать на Титане, является энергия ветра. Однако, по данным миссии «Кассини-Гюйгенс», скорость ветра на поверхности невелика и составляет ~ 0,3 м/с,

Таблица 1. Состав атмосферы Титана (Titan's atmosphere composition)

что, учитывая низкую компактность ветряных электростанций, ставит под сомнение перспективность данного метода [5].

Безусловно, использование атомной энергии, например, с помощью РИТЭГов (радиоизотопный термоэлектрический генератор), может являться решением проблемы. Однако, данный подход также имеет ряд недостатков: необходимость проведения хранения, перезагрузки, утилизации ядерного топлива и связанная с этим опасность для людей [6–8].

В связи со сложностью и дороговизной доставки оборудования на столь удаленные от Земли расстояния, стоит рассмотреть возможность применения местных материалов для энергоустановок [9]. Состав атмосферы и почвы Титана изучен, что позволяет использовать различные вещества при проектировании необходимого оборудования [10, 11]. Для решения задачи построения силового цикла криовулканы принимаются кипящей средой с температурой 234 К, а атмосфера – газовой средой с температурой 100 К.

Исходя из состава атмосферы, приведённого в таблице 1, и озёр [12, 13] на располагаемых ресурсах геотермальной энергии целесообразно применение 3 видов термодинамических циклов:

- 1. Газовый цикл Брайтона.
- 2. Докритический цикл Ренкина.
- 3. Закритический цикл Ренкина.

ВЫБОР РАБОЧИХ ВЕЩЕСТВ

Оборудование для экстракции рабочих веществ в целом является, но все же альтернативой перевозки дополнительной массы рабочего вещества в ракетеносителе. Возможность непрерывно выделять необходимые рабочие вещества также позволяет эксплуатировать установку в непрерывном режиме даже при наличии негерметичностей и утечек в системе [14].

Однако, подходящих для организации силового цикла, в температурных условиях Титана таких веществ не очень много [15]. Данный факт на этапе

Вещество	Критическая точка, К	Нормальная темпера- тура, К	Тройная точка, К	Содержание в атмос- фере, %
Азот	126,2	77,4	63,2	95
Метан	190,6	111,7	90,7	4
Этан	305,2	184,6	90,4	
Пропан	369,9	231	85,5	
Углекислый газ	304,1	194,8	216,6	1
Угарный газ	132,8	81,6	68,2	
Гелий	5,2	4,2	2,2	

 Table 1. Composition of Titan's atmosphere

проектирования установки может продемонстрировать меньшую эффективность местных рабочих веществ по сравнению с более сложными, синтезируемыми на Земле рабочими веществами. Основным физическим параметром при выборе рабочего тела для разного типа циклов следует считать критическую температуру, которая позволяет сопоставить местные вещества с подходящими для них типов циклов.

При выборе рабочего тела для циклов различной конфигурации отбор производился по комбинации критической и тройной точек.

Для газового цикла Брайтона подходящими веществами выступают азот и гелий. Содержание гелия в атмосфере Титана крайне невелико, получение его может оказаться весьма непростой задачей и в дальнейшем рассматриваться не будет [16].

Для докритического цикла Ренкина наиболее подходящим веществом является метан, содержание которого в атмосфере достаточно высоко [17]. Несовершенство метана, как рабочего тела, для реализации источника высокой температуры в докритическом цикле Ренкина и пути выхода из данной ситуации описаны ниже.

Для закритического цикла Ренкина подходящими веществами является азот и метан.

В процессе выполнения расчетов были приняты следующие допущения:

- Высокотемпературный источник представлен потоком жидкой фазы с водяным эквивалентом, стремящимся к бесконечности и температурой 235 К.
- Низкотемпературный сток тепловой энергии представлен газовой фазой, водяным эквивалентом, также стремящимся к бесконечности и температурой 97 К.
- Минимальный температурный напор при теплопередаче в испарителе к газовой фазе не менее 20 К.
- Минимальный температурный напор при теплопередаче к двухфазному потоку не менее 10 К.
- Потери давления в теплообменных аппаратах и проводящей арматуре пренебрежимо малы.
- 6. Изоэнтропная эффективность машин составляет 75%.
- 7. Расход рабочего тела составляет 1 кг/с.

	раздо большие габаритные размеры проходных сечений
она подходящими веще-	машин и аппаратов по сравнению с циклом Ренкина.

ание гелия в атдение его может в дальнейшем наиболее подн, содержание Дополнительно, применение газового цикла затрудняется необходимостью превышения критической температуры и, как следствие, завышение рабочих давлений. В случае использования азота в качестве рабочего тела это температура будет не ниже 126,2 К. Также, при работе с источником температуры высоко-

ГАЗОВЫЙ ЦИКЛ БРАЙТОНА

Рабочим телом газового цикла принимаем некон-

денсируемый азот, содержание которого в атмосфере

обеспечивает его низкую стоимость. На основе цикла

Брайтона можно спроектировать простую схему из мини-

мального количества элементов (рис. 1): детандер-ком-

прессорного агрегата и двух теплообменных аппаратов.

низкая плотность рабочего тела, что предполагает го-

го водяного эквивалента и газовой средой с большим

Существенным недостатком данной схемы является



Рис. 1. Принципиальная схема и Т – S диаграмма цикла Брайтона. *К* – конденсатор, *П* – пневмомотор с электрогенератором, *ТК* – турбокомпрессор, *И* – нагреватель.

Fig. 1. Schematic diagram and T-S diagram of the Brayton cycle. K – capacitor, Π – pneumatic motor with an electric generator, TK – centrifugal compressors, M – evaporator.

Давление в горячем ТА, бар	Мощность горячего ТА, кВт	Мощность детандера, кВт	Мощность компрессора, кВт	Полезная мощность	кпд
90	103,1	31,7	24,7	7	0,06
80	111,2	28,3	20,4	7,9	0,07
70	119,7	24,1	16	8	0,06
60	128,5	18,8	11,4	7,4	0,05
50	137,8	11,8	5,4	6,4	0,04

Таблица 2. Характеристики цикла Брайтона **Table 2.** The characteristics of the Brayton cycle

перепадом температуры возникают дополнительные потери, связанные с высоким температурным напором, который будет составлять не менее 26,2 К. Давление в охладителе в данном случае оказывается порядка 40 бар. Рабочие характеристики цикла Брайтона приведены в таблице 2.

ДОКРИТИЧЕСКИЙ ЦИКЛ РЕНКИНА

Цикл Ренкина термодинамически наиболее близок к циклу Карно, и его легко реализовать, благодаря наличию рабочих тел, которые могут испытывать фазовый переход, как при температуре источника, так и при температуре стока теплоты (рис. 2).

Наиболее подходящим веществом из состава атмосферы является метан. Его содержание достаточно высоко. Рабочие давления при расчете докритического цикла остаются выше атмосферного при конденсации и не превышают 40 бар при кипении. Однако, критическая температура метана не позволяет использовать высокотемпературный потенциал криовулканов в докритическом цикле Ренкина.

Влияние Давления Кипения

Увеличение разности давлений слабо сказывается на общей эффективности цикла: рост мощности детандера за счет увеличения степени расширения компенсируется увеличением необходимой мощности насоса. Кроме того, общая эффективность цикла увеличивается, благодаря уменьшению тепловой мощности необходимой для подогрева и испарения рабочего тела.



Рис. 2. Принципиальная схема и T – S диаграмма цикла Ренкина. *К* – конденсатор, *П* – пневмомотор с электрогенератором, *H* – насос, *И* – испаритель.

Fig. 2. Schematic diagram and T-S diagram of the ORC. K – capacitor, Π – pneumatic motor with an electric generator, H – pump, M – evaporator.

На диаграмме p-h наклон правой пограничной кривой обеспечивает снижение удельных затрат тепловой энергии, подводимой в испаритель, и увеличивает долю жидкости в потоке после детандера. Следует также отметить изменение долей тепловой мощности испарителя на тепло подогрева жидкости до линии насыщения и на тепло фазового перехода с ростом рабочего давления кипения. Увеличение доли тепла подогрева жидкости нежелательно. Во-первых, это отдаляет цикл от цикла Карно за счет подвода энергии больше по изобаре, чем по изотерме. Во-вторых, коэффициент теплоотдачи принудительно движущейся жидкости может значительно отличаться от коэффициента теплоотдачи при кипении. В случае проектирования испарителя это может привести к увеличению теплообменного аппарата при его работе с эвтектическим раствором потока из криовулкана [18].

Влияние Величины Перегрева

При проектировании докритического цикла с метаном обеспечение необходимого перегрева является единственной возможностью максимально реализовать температурный потенциал горячего источника. Достаточно высокая величина перегрева также необходима при проектировании цикла с условием гарантированно сухого пара на выходе из детандера. Однако, коэффициент теплоотдачи от пара существенно ниже прочих слагаемых коэффициента теплопередачи. Это приводит к значительному увеличению размеров теплообменного аппарата на каждый градус перегрева, вместе с тем, это позволяет увеличить эффективность цикла [19].

Минимальный температурный напор для процесса конденсации метана принимается равным 10 К. Тогда температура конденсации составит 110 К, а давление конденсации 0,88 бар.

Докритический цикл Ренкина обладает рядом существенных преимуществ при отборе тепла из геотермальных источников на Титане: подвод энергии в процессе фазового перехода позволяет сильно сократить габаритные размеры теплообменных аппаратов за счёт высокой удельной теплоты парообразования и высокого коэффициента теплопередачи при кипении и конденсации.

Однако, в пределах Титана нет подходящих веществ, способных полностью реализовать потенциал высокотемпературного источника. Возможность увеличения температуры фазового перехода ограничена критической точкой метана. Единственным способом в такой ситуации является обеспечение достаточного перегрева, что существенно увеличивает размеры установки за счёт необходимости подвода тепла к рабочему телу в паровой фазе [20].

Возможным решением этой проблемы может стать переход к закритическому циклу или модернизация схемы до каскадной. В качестве рабочего тела верхнего каскада выбираем хладон R14. Органическое вещество с минимальным значением критической температуры. Температурная разбивка каскадов выбирается с условием ORIGINAL STUDY ARTICLE

недорекуперации в испарителе порядка 15–20 К и разности температуры фазовых переходов R14 и метана в 10 К. Такие условия позволяют осуществлять эффективный отбор тепла от источника с минимальным перегревом [21].

Дополнительная рассмотрим случай работы ветви R14 с перегревом вплоть до 15 К, что показывает незначительное отличие от цикла без перегрева, не решая, в свою очередь, проблемы с выпадением жидкости в процессе расширения (рис. 3, 4, 5, 6).

КАСКАДНЫЙ ДОКРИТИЧЕСКИЙ ЦИКЛ РЕНКИНА

- 1. Температура кипения: 204,9 К, давление кипения: 18 бар.
- Температура конденсации: 150,2 К, давление конденсации: 1,43 бар.



Рис. 3. Зависимость теплоты перегрева пара от величины перегрева.

Fig. 3. Dependence of the overheating heat of vapour on the amount of overheating.



Рис. 5. Зависимость доли жидкости от величины перегрева. **Fig. 5.** Dependence of the liquid fraction in the amount of overheating.

 Тепло подогрева и кипения: 139,3 кДж; работа насоса: 1,383 кДж.

При значительном изменении долей суммарной тепловой нагрузки изменение коэффициента преобразования тепла в работу не превышает одного процента, что показывает неоправданность такого технического решения. Данные расчетов приведены в таблице 3. В дальнейшем рабочее давление кипения R14 выбирается максимально возможным из условий соблюдения минимального перегрева и минимально необходимого температурного напора (рис. 8).

R14 (Цикл Без Перегрева)

- Температура кипения: 220 К, давление кипения: 30 бар.
- Температура конденсации: 150,2 К, давление конденсации: 1,43 бар.
- 3. Теплота нагрузки: 134,2 кДж; Работа насоса: 2,38 кДж.



Рис. 4. Соотношение теплоты подогрева и кипения в зависимости от рабочего давления.

Fig. 4. Heating to boiling ratio depending on the working pressure.





108

Перегрев, К	Температура на входе, К	Доля жидкости	Теплота перегрева, кДж	Работа, кДж	Коэффициент преобразования тепла в работу
1	205,9	0,91	1	22,5	0,151
5	209,9	0,932	4,79	23,24	0,152
10	214,9	0,961	9,191	24,14	0,153
15	219,9	0,986	13,36	25,05	0,155
25	229,9	1	21,27	26,88	0,159

Таблица 3. Оптимизация перегрева каскадного цикла **Table 3.** Optimization of overheating cascade cycle

 Работа турбины: 24,59 кДж; Доля жидкости: 0,856; КПД: 0,165.

Несмотря на принципиальную возможность создания системы с минимальной долей теплообмена газовой фазы рабочего тела и, как следствие, минимальных габаритных размеров установки такая схема имеет ряд существенных недостатков. Главным из них следует считать невысокий относительно одноступенчатого цикла коэффициент преобразования тепла в работу, что приводит к необходимости использовать большие расходы греющего и охлаждающего потоков для обеспечения эквивалентной мощности (рис. 7).

Немаловажным недостатком каскадной схемы также является ее перегруженность рабочими элементами — машинами и аппаратами, предполагающими сопоставимый расход рабочих тел, что серьезно сказывается на надежности установки и сложности систем автоматического управления. Кроме того, стоит отметить необходимость доставки запаса рабочего тела с учетом его возможных утечек на столь удаленное от Земли расстояние.

Сравнивая одноступенчатые и каскадные циклы, очевидно, отсутствие выгоды от усложнения схемы. При необходимости доставки дополнительного оборудования на Титан, данное техническое решение оказывается крайне неэффективным.

Закритический цикл является компромиссом, позволяющим использовать метан или азот в качестве рабочего тела в одноступенчатом цикле с большей степенью расширения относительно до критического цикла, хотя и худшими условиями теплопередачи в испарителе, при равнозначных условиях конденсации. В расчете представлены результаты вычислений закритического цикла для азота с перебором возможных давлений в испарителе.

В целом, сохранение параметров конденсации докритического цикла и возможность работы с более высоким давлением перед турбиной при одинаковой температуре



Рис. 7. Принципиальная схема и T – S диаграмма каскадного цикла Ренкина. K – конденсатор, K-U – межступенчатый конденсатор-испаритель, Π , Π' – пневмомоторы с электрогенератором, H, H' – насосы, U – испаритель. **Fig.** 7. Schematic diagram and T-S diagram of the cascade Rankine cycle. K – capacitor, K-U – interstage capacitor-evaporator, Π , Π' – pneumatic motors with an electric generator, H, H' – pumps, V – evaporator.



Рис. 8. Принципиальная схема и Т – S диаграмма сверхкритического цикла Ренкина. К – конденсатор, П – пневмомотор с электрогенератором, Н – насос, И – испаритель.

Fig. 8. Schematic diagram and T-S diagram of the supercritical Rankine cycle. K – condenser, Π – pneumatic motor with an electric generator, H – pump, N – evaporator.

DOI: https://doi.org/10.17816/RF322837

109

позволяет получать большие значения эффективности. Однако, циклы такого типа характеризуются гораздо более высокими рабочими давлениями, что может значительно повлиять на надежность установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе расчётов, представленных в таблице 4, было установлено, что максимальный КПД был достигнут в простом докритическом цикле Ренкина с перегревом пара перед турбиной. Данный результат не очевиден, так как, с первого взгляда, в случае закритического цикла Ренкина, удаётся получить большее давление рабочего тела перед турбиной, каскадный же цикл позволяет реализовать теплоту источника практически без перегрева. Однако, наиболее высокий КПД достигается у тех циклов, которые максимально близки к циклу Карно

Таблица 4. Сравнение циклов по КПД **Table 4.** Comparison of cycles by efficiency

и имеют минимальные потери при прочих равных условиях. В случае закритического цикла отличие от цикла Карно возникает из-за подвода теплоты рабочему телу в газовой области. Каскадный же цикл имеет потери, связанные с наличием дополнительного теплообменного аппарата – конденсатора-испарителя и недорекуперации в нём. Газовый цикл Брайтона максимально далёк от цикла Карно по сравнению с остальными, поэтому имеет наименьший КПД (см. рис. 9–11).

Таким образом, можно однозначно заключить, что для исследованных условий наилучшим будет являться докритический цикл Ренкина с перегревом пара перед турбиной. Причём лучшим его можно назвать не только с точки зрения эффективности, но и с технологической точки зрения. Он имеет меньшее количество аппаратов и машин по сравнению с каскадным и для его реализации требуются более низкие давления,

Соотношение работы и теплоты

Тип цикла	Максимальный КПД	Рабочее тело
Цикл Брайтона	0,07	Азот
Цикл Ренкина	0,223	Метан
Закритический цикл Ренкина	0,188	Метан
Каскалный цикл Ренкина	0,165	Метан и R14





Рис. 10. Определение эффективности цикла. Fig. 10. Cycle efficiency determination.





Рис. 11. Оценка эффективности цикла. **Fig. 11.** Cycle efficiency assessment.

Оптимизация по давлению

111

что позволит сделать аппараты и трубопроводы с меньшой толщиной стенки, а, следовательно, более лёгкими, что важно с точки зрения доставки оборудования на Титан.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведенным исследованием и публикацией настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hörst S.M. Titan's atmosphere and climate // JGR Planets. 2017. Vol. 122, N 3. P. 432–482. doi: 10.1002/2016JE005240

2. Hayes A.G., Aharonson O., Lunine J.I., et al. Transient surface liquid in Titan's polar regions from Cassini // Icarus. 2011. Vol. 211, N 1. P. 655–671. doi: 10.1016/j.icarus.2010.08.017

3. Lunine J.I. Does Titan have oceans? // American Scientist. 1994. Vol. 82, N 2. P. 134–143.

4. Müller-Wodarg I., Griffith C.A., Lellouch E., et al. Titan: Interior, surface, atmosphere, and space environment. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. doi: 10.1111/maps.12317

5. Porco C.C., Baker E., Barbara J., et al. Imaging of Titan from the Cassini spacecraft // Nature. 2005. Vol. 434. P. 159–168. doi: 10.1038/nature03436

6. Fortes A.D., Grindrod P.M., Trickett S.K., et al. Ammonium sulfate on Titan: Possible origin and role in cryovolcanism // Icarus. 2007. Vol. 188, N 1. P. 139–153. doi: 10.1016/j.icarus.2006.11.002

7. less L., Jacobson R.A., Ducci M., et al. The tides of Titan // Science. 2012. Vol. 337, N 6093. P. 457–459. doi: 10.1126/science.1219631

8. Mitri G., Showman A.P., Lunine J.I., et al. Resurfacing of Titan by ammonia-water cryomagma // Icarus. 2008. Vol. 196, N 1. P. 216–224. doi: 10.1016/j.icarus.2008.02.024

9. Fortes A.D. Titan's internal structure and the evolutionary consequences // Planetary and Space Science. 2012. Vol. 60, N 1. P. 10–17. doi: 10.1016/j.pss.2011.04.010

10. Mousis O., Schmitt B. Sequestration of ethane in the cryovolcanic subsurface of Titan // ApJ. 2008. Vol. 677, N 1. P. L67–L70. doi: 10.1086/587141

11. Cordier D., Mousis O., Lunine J.I., et al. An estimate of the chemical composition of Titan's lakes // ApJ. 2009. Vol. 707, N 2. P. L128–L131. doi: 10.1088/0004-637X/707/2/L128

12. Sotin C., Lawrence K.J., Reinhardt B., et al. Observations of Titan's Northern lakes at 5 μ m: Implications for the organic cycle and geology // Icarus. 2012. Vol. 221, N 2. P. 768–786. doi: 10.1016/j.icarus.2012.08.017

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contributions. All authors made a substantial contribution to the conceptual development, research, and preparation of this article and read and approved the final version before publication.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

13. Lunine J.I., Lorenz R.D. Rivers, lakes, dunes, and rain: Crustal processes in Titan's methane cycle // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2009. Vol. 37. P. 299–320. doi: 10.1146/annurev.earth.031208.100142

14. Castillo-Rogez J.C., Lunine J.I. Evolution of Titan's rocky core constrained by Cassini observations // Geophysical Research Letters. 2010. Vol. 37. P. L20205. doi: 10.1029/2010GL044398

15. Cordier D., Mousis O., Lunine J.I., et al. Titan's lakes chemical composition: sources of uncertainties and variability // Planetary and Space Science. 2012. Vol. 61, N 1. P. 99–107. doi: 10.1016/j.pss.2011.05.009

16. Luspay-Kuti A., Chevrier V.F., Cordier D., et al. Experimental constraints on the composition and dynamics of Titan's polar lakes // Earth and Planetary Science Letters. 2015. Vol. 410. P. 75–83. doi: 10.1016/j.epsl.2014.11.023

17. Tokano T., Lorenz R.D. Sun-stirred Kraken Mare: Circulation in Titan's seas induced by solar heating and methane precipitation // Icarus. 2016. Vol. 270. P. 67–84. doi: 10.1016/j.icarus.2015.08.033
18. Voronov V., Leonov V. Testing of a scroll expander in various models // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. Vol. 51, N 1.

P. 33–36. doi: 10.1007/s10556-015-9993-3

19. Ivlev V., Bozrov V., Voronov V. Testing a scroll machine in pneumatic motor expander modes. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. Vol. 44, N 2. P. 120–124. doi: 10.3103/S1052618815020053

20. Леонов В.П., Воронов В.А., Апсит К.А., и др. Цикл Ренкина с низкопотенциальным источником теплоты // Инженерный журнал: Наука и инновации. 2015. Вып. 2. С. 1–7

21. Апсит К.А., Хуциева С.И., Паркин А.Н., и др. Стенд для исследования смесительного теплообменника-испарителя низкопотенциальной энергоустановки. // Инженерный журнал: Наука и инновации. 2015. Вып. 7. С. 1–11. doi: 10.18698/2308-6033-2015-7-1430

REFERENCES

1. Hörst SM. Titan's atmosphere and climate. *JGR Planets.* 2017;122(3):432–482. doi: 10.1002/2016JE005240

2. Hayes AG, Aharonson O, Lunine JI, et al. Transient surface liquid in Titan's polar regions from Cassini. Icarus. 2011;211(1):655–671. doi: 10.1016/j.icarus.2010.08.017

3. Lunine JI. Does Titan have oceans? *American Scientist.* 1994;82(2):134–143.

4. Müller-Wodarg I, Griffith CA, Lellouch E, et al. *Titan: Interior, surface, atmosphere, and space environment*. Cambridge: Cambridge University Press; 2014. doi: 10.1111/maps.12317

 Porco CC, Baker E, Barbara J, et al. Imaging of Titan from the Cassini spacecraft. *Nature*. 2005;434:159–168. doi: 10.1038/nature03436
 Fortes AD, Grindrod PM, Trickett SK, et al. Ammonium sulfate on Titan: Possible origin and role in cryovolcanism. Icarus. 2007;188(1):139–153. doi: 10.1016/j.icarus.2006.11.002

7. less L, Jacobson RA, Ducci M, et al. The tides of Titan. *Science*. 2012;337(6093):457–459. doi: 10.1126/science.1219631

8. Mitri G, Showman AP, Lunine JI, et al. Resurfacing of Titan by ammonia-water cryomagma. *Icarus.* 2008;196(1):216–224. doi: 10.1016/j.icarus.2008.02.024

9. Fortes AD. Titan's internal structure and the evolutionary consequences. *Planetary and Space Science*. 2012;60(1):10–17. doi: 10.1016/j.pss.2011.04.010

10. Mousis O, Schmitt B. Sequestration of ethane in the cryovolcanic subsurface of Titan. *ApJ.* 2008;677(1):L67–L70. doi: 10.1086/587141 **11.** Cordier D, Mousis O, Lunine JI, et al. An estimate of the chemical composition of Titan's lakes. *ApJ.* 2009;707(2):L128–L131. doi: 10.1088/0004-637X/707/2/L128

12. Sotin C, Lawrence KJ, Reinhardt B, et al. Observations of Titan's Northern lakes at 5 μ m: Implications for the organic cycle and geology. Icarus. 2012;221(2):768–786. doi: 10.1016/j.icarus.2012.08.017

13. Lunine JI, Lorenz RD. Rivers, lakes, dunes, and rain: Crustal processes in Titan's methane cycle. *Annual*

ОБ АВТОРАХ

* Апсит Константин Александрович;

адрес: Российская Федерация, 105005, Москва, Лефортовская наб., д. 1; ORCID: 0009-0008-9867-5511; eLibrary SPIN: 4063-7450; e-mail: apsit.k@bmstu.ru

Жаров Антон Андреевич,

канд. техн. наук; ORCID: 0000-0001-9945-0850; eLibrary SPIN: 8581-1809; e-mail: zharov_a@bmstu.ru

Воронов Владимир Андреевич,

канд. техн. наук; ORCID: 0000-0001-8581-9936; eLibrary SPIN: 4502-9590; e-mail: vavoronov@bmstu.ru

* Автор, ответственный за переписку

Review of Earth and Planetary Sciences. 2009;37:299–320. doi: 10.1146/annurev.earth.031208.100142

14. Castillo-Rogez JC, Lunine JI. Evolution of Titan's rocky core constrained by Cassini observations. *Geophysical Research Letters*. 2010;37:L20205. doi: 10.1029/2010GL044398

15. Cordier D, Mousis O, Lunine JI, et al. Titan's lakes chemical composition: sources of uncertainties and variability. *Planetary and Space Science*. 2012;61(1):99–107. doi: 10.1016/j.pss.2011.05.009

16. Luspay-Kuti A, Chevrier VF, Cordier D, et al. Experimental constraints on the composition and dynamics of Titan's polar lakes. *Earth and Planetary Science Letters.* 2015;410:75–83. doi: 10.1016/j.epsl.2014.11.023

17. Tokano T, Lorenz RD. Sun-stirred Kraken Mare: Circulation in Titan's seas induced by solar heating and methane precipitation. Icarus. 2016;270:67–84. doi: 10.1016/j.icarus.2015.08.033

18. Voronov V, Leonov V. Testing of a scroll expander in various models. *Chemical and Petroleum Engineering.* 2015;51(1):33–36. doi: 10.1007/s10556-015-9993-3

19. Ivlev V, Bozrov V, Voronov V. Testing a scroll machine in pneumatic motor expander modes. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015;44(2):120–124. doi: 10.3103/S1052618815020053

20. Leonov VP, Voronov VA, Apsit KA, et al. Rankine cycle with a low-grade heat source. *Inzhenernyy zhurnal: Nauka i innovatsii.* 2015;2:1-7. (In Russ).

21. Apsit KA, Khutsieva SI, Parkin AN, et al. Stand for the study of a mixing heat exchanger-evaporator of a low-potential power plant. *Inzhenernyy zhurnal: Nauka i innovatsii.* 2015;7:1–11. (In Russ). doi: 10.18698/2308-6033-2015-7-1430

AUTHORS' INFO

* Konstantin A. Apsit;

address: 1 Lefortovskaja naberezhnaja, 105005 Moscow, Russian Federation; ORCID: 0009-0008-9867-5511; eLibrary SPIN: 4063-7450; e-mail: apsit.k@bmstu.ru

Anton A. Zharov,

Cand. Sci. (Tech.); ORCID: 0000-0001-9945-0850; eLibrary SPIN: 8581-1809; e-mail: zharov_a@bmstu.ru

Vladimir A. Voronov,

Cand. Sci. (Tech.); ORCID: 0000-0001-8581-9936; eLibrary SPIN: 4502-9590; e-mail: vavoronov@bmstu.ru

* Corresponding author