

DOI: 10.12737/article\_5968b450cbb1f2.30358807

Бегдай С.Н., канд. техн. наук, доц.,  
Сторожук Т.А., канд. техн. наук, доц.

Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина

## АДСОРБЦИОННЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ В СИСТЕМАХ ТРИГЕНЕРАЦИИ

219bs@mail.ru

*На сегодняшний момент не все возводимые здания и сооружения в полной мере не могут быть обеспечены сетевыми энергоресурсами. Стали множиться отказы в выдаче технических условий, наряду с этим увеличилась цена за подсоединение. Решением данной проблемы может служить газопоршневые или газотурбинные установки. При условии, что грамотно посчитан энергобаланс здания и соответствующим образом подошли к использованию вырабатываемых энергоресурсов, то есть загрузка находится на приемлемом для данного агрегата уровне. Данные установки могут обеспечить здание теплом, холодом и электроэнергией при сравнительно не больших материальных затратах. Не выгодным является использование данных установок в межсезонье, когда внутренний температурный режим соответствует наружному, в это время целесообразно пользоваться сетевыми ресурсами.*

**Ключевые слова:** солнечный коллектор, адсорбционная холодильная машина, тригенерация.

**Введение.** На первый взгляд может показаться, что из-за разности энергозагруженности конкретно рассматриваемого здания, использование выше указанных установок не имеет смысла, и может оказаться, что в некоторых случаях это так и есть, но если потребление сбалансировано, то установки могут использоваться. Так же стоит отметить что более массово данная технология может использоваться совместно с адсорбционными холодильными машинами в режиме тригенерации [1, 2, 9, 8, 16].

Для повышения эффективности комбинированных гелиоколлекторных установок с солнечными батареями (кгусб) в летний период, когда у потребителей значительно снижается потребность в тепле, и растут затраты энергии на кондиционирование, комбинированная установка используют еще и для производства холода, то есть в режиме тригенерации [3–6].

Производство холода в адсорбционной машине достигается вследствие трансформации тепла путем сочетания прямого цикла превращения его в работу и обратного цикла – получения холода с расходом работы. В осуществлении цикла холодильной машины участвуют три источника тепла: нагреватель, окружающая среда и охлаждающий объект [12–15].

В адсорбционных холодильных установках возможно использование избыточной теплоты, получаемой на гелиоколлекторной установке, с целью производства холода для технологических нужд. Комбинированных гелиоколлекторных установок с солнечными батареями с получением холода является дополнительным инструментом для стимуляции повышения

энергетической эффективности сложных технологических процессов и предприятий в целом.

**Основная часть.** Выбор типа адсорбционной холодильной машины для тригенерационной установки определяется, главным образом, температурой охлаждения, требуемой для технологического процесса, и холодильной нагрузкой. Если требуются температуры охлаждения более 0 °С, то используются бромистолитиевые адсорбционные холодильные машины.

На рис. 1 приведена схема комбинированной гелиоколлекторной установок с солнечными батареями, которая включена в контур холодильной системы. В этой схеме теплота гелиоколлекторной установки используется в десорбере либо непосредственно (рис. 1, а), либо через промежуточный теплообменник, в котором теплота от теплоносителя гелиоколлекторной установки переходит в начале в теплоту горячей воды или пара (рис. 1, б) [11].

Достоинством схемы «а» является отсутствие дополнительного теплообменника, удешевление установки, улучшение ее компоновки. Преимуществом схемы «б» является то, что пар или горячую воду, вырабатываемые для адсорбционной холодильной установки, можно использовать и для других целей, что делает установку универсальной.

Система управления адсорбционной холодильной установки работает, как правило, независимо от системы управления гелиоколлекторной установки. Если нет потребности в охлаждении, а гелиоколлекторная установка продолжает работать, то поток теплоносителя автоматически

байпасирует контур десорбера адсорбционной холодильной установки.

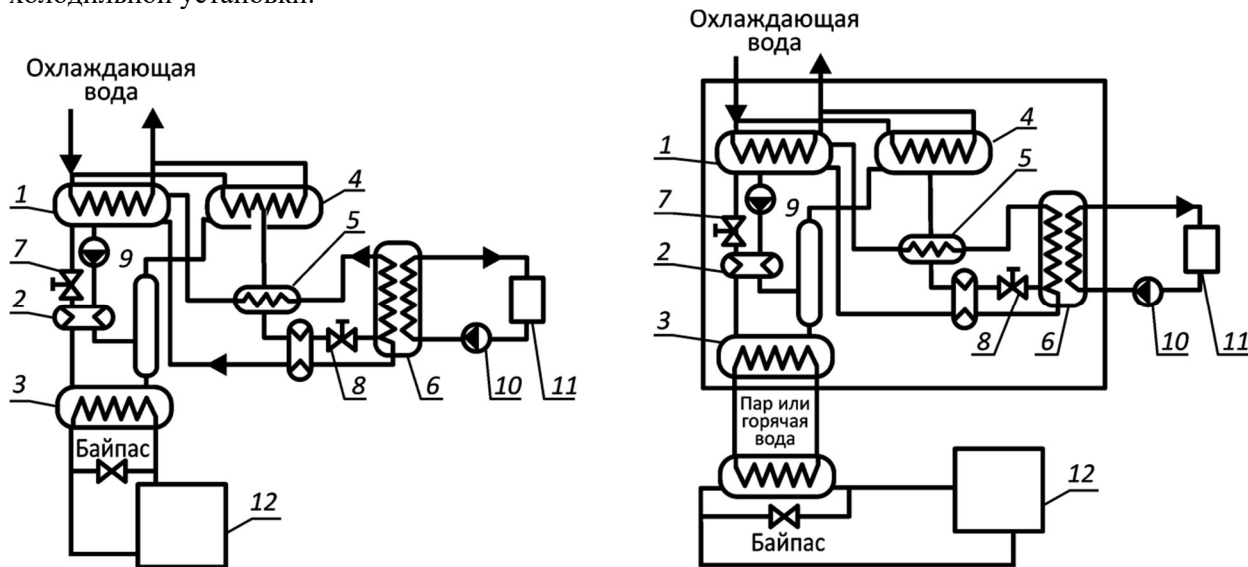


Рис. 1. Схема адсорбционной холодильной установки, работающей совместно с гелиоколлекторной установкой, при использовании теплоты теплоносителя (а) и горячей воды/пара (б) 1 – адсорбер; 2 – теплообменник растворов; 3 – десорбер; 4 – конденсатор; 5 – парожидкостный теплообменник; 6 – испаритель; 7 – дроссельный вентиль раствора; 8 – дроссельный вентиль рабочего тела; 9 – насос крепкого раствора; 10 – контур раствора; 11 – холодильная установка; 12 – гелиоколлекторная установка

Технологические процессы с применением теплоты и холода, расходы которых изменяются во времени, можно оптимизировать, применяя адсорбционную холодильную машину в сочетании с буферным ледяным холодильником. Когда уменьшается или прекращается подача пара на адсорбционную холодильную машину (например – ночью), то включается «ледяной» буфер, а адсорбционная холодильная установка переходит на частичную мощность или вообще останавливается.

На рис. 2 показана схема комбинированной гелиоколлекторной установки с солнечными батареями, в которой часть теплоты выхлопных от гелиоколлекторной установки используется в адсорбционной холодильной машине для получения холода, а другая для горячего водоснабжения [10].

Еще один вариант тригенерационной установки показан на рис. 3.

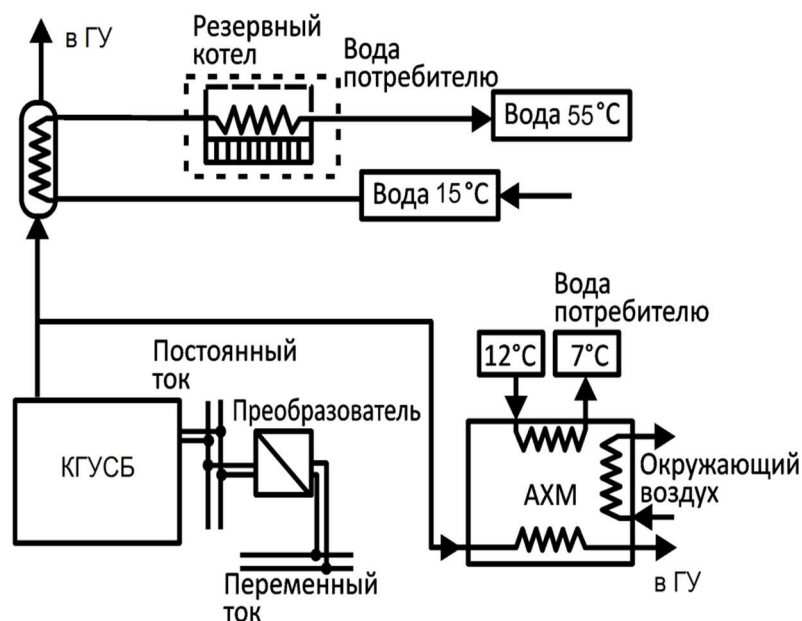


Рис. 2. Схема тригенерационной установки на основе комбинированной гелиоколлекторной установка с солнечными батареями

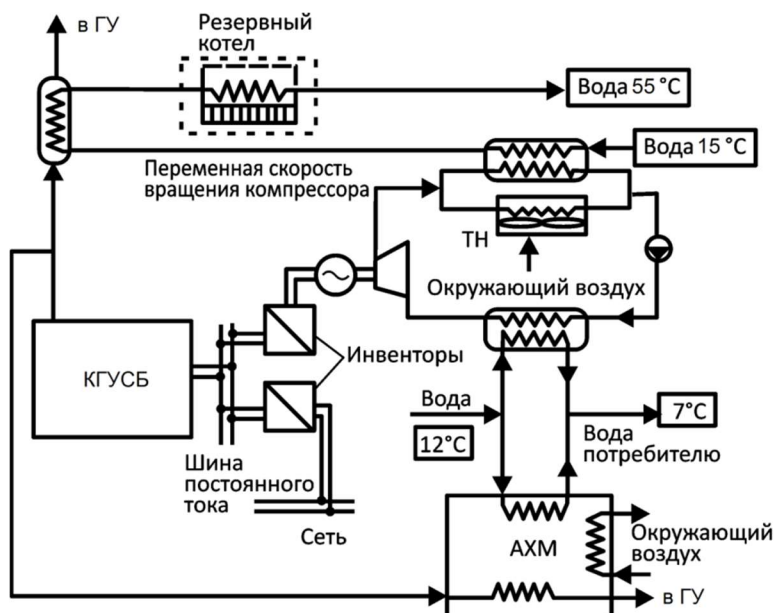


Рис. 3. Схема тригенерационной установки на базе комбинированная гелиоколлекторной установки с солнечными батареями, теплового насоса и адсорбционной холодильной машины

От предыдущей схемы она отличается тем, что третьим полезным продуктом (кроме электроэнергии и теплоты) является холодная вода (+7...+12 °С), циркулирующая в системе кондиционирования здания и вырабатываемая как в тепловом насосе, так и в адсорбционной холодильной машине.

Сопоставление схем проводится по четырем основным показателям: электрический КПД электрогенерации  $\eta_{э}$ , коэффициент использования топлива  $K_{ум}$ , эксергетический КПД системы  $\eta_{ex}$ , относительная экономия топлива  $\Delta g_m$ , рассчитываемые по уравнениям:

$$\eta_{э} = \frac{N_{э}}{g_{мон} Q_n^p}, \tag{1}$$

$$K_{ум} = \frac{N_{э} + Q_m}{g_{мон} Q_n^p}, \tag{2}$$

$$\eta_{ex} = \frac{N_{э} + E_Q}{g_{мон} E_{мон}}, \tag{3}$$

где  $W_0$  – объем адсорбционного пространства, в котором действует адсорбционное поле;  $\Theta = a/a_0$  – степень заполнения этого объема;  $a_0$  – предельная величина адсорбции в объеме  $W_0$  при давлении  $p_s$ . Связь величин  $\varepsilon$  и  $\xi$  вытекает из уравнения (5):

$$\varepsilon = RT \ln p_s / p = \xi - RT \ln \Theta. \tag{6}$$

$$\Delta g_m = \frac{g_{мон} Q_n^p}{\frac{W_{э}}{\eta_{э.раз}} + \frac{Q_m}{\eta_{m.раз}} + \frac{Q}{K_{раз}}}, \tag{4}$$

где  $E_Q, E_{мон}$  – эксергия теплоты и топлива, соответственно;  $\eta_{э.раз}, \eta_{m.раз}, K_{раз}$  – эффективность раздельной выработки электроэнергии, теплоты, холода;  $g_{мон}$  – расход топлива в микротурбинной генерации.

Параметры адсорбционного процесса существенно зависят от температуры. Представляет интерес зависимость адсорбционного равновесия от температуры.

Теория изотермы адсорбции была создана И. Ленгмюром, в дальнейшем вместо адсорбционного потенциала И. Ленгмюра получили

$$\Psi = RT \ln \frac{c_1}{c_2}, \text{ где } R \text{ – газовая постоянная, } T \text{ –}$$

температура,  $c_1$  и  $c_2$  – концентрация компонентов смеси, предлагается функция  $\xi$ , которая равна.

$$\xi = \Psi - \Psi_0 = RT \ln \frac{a}{w_0} \frac{RT}{p} - RT \ln \frac{a_0}{w_0} \frac{RT}{p_s} = RT \ln p_s \Theta / p, \tag{5}$$

Дифференцируя уравнение (6) по  $T$  при  $\Theta = const$ , получим

$$(d\varepsilon / dT)_{\Theta} = (d\xi / dT)_{\Theta} - R \ln \Theta. \tag{7}$$

Рассматривая адсорбционную систему при  $\Theta = const$ , можно установить аналогию термодинамических свойств такой системы и свойств объемного раствора.

Величины  $\xi$  и  $(d\xi/dT)_\Theta$  можно рассматривать как парциальные «избыточные» свободную энергию и энтропию, обусловленные молекулярными взаимодействиями, подобно тому, как это принято делать при термодинамическом анализе объемных растворов. Поэтому производную  $(d\xi/dT)_\Theta$  можно назвать парциальной «энтропией взаимодействий» ( $\Delta S_{вз}$ ), а величина  $R \ln \Theta$  – парциальной «энтропией смешения» ( $\Delta S_{см}$ ) при образовании идеальной адсорбционной системы. Вводя эти обозначения в уравнение (7), получим

$$\Delta S_\Theta = (d\varepsilon/dT)_\Theta \Delta S_{вз} + \Delta S_{см}. \quad (8)$$

Величина  $\Delta S_\Theta$  связана с дифференциальной энтропией адсорбции  $\Delta S_a$  уравнением

$$\Delta S_a = \Delta S_\Theta + \alpha(d\varepsilon/d \ln \Theta)_T. \quad (9)$$

в котором второй член может быть получен дифференцированием изотермы адсорбции, где  $\alpha = -d \ln a_0 / dt$  – коэффициент теплового расширения насыщенной адсорбционной фазы при  $p_s$ .

По уравнению Гиббса-Гельмгольца, написанного для адсорбционного равновесия при

$$\ln h_2 = (T_1/T_2) \ln h_1 - (1 - T_1/T_2)(\Delta S_{вз}/R - \ln \Theta), \quad (13)$$

где  $h = p/p_s$  – относительное давление, а индексы 1 и 2 указывают температуру.

Уравнение (13) позволяет вычислить точку с координатами  $(\Theta, h_2)$  на изотерме  $T_2$ , если известна точка  $(\Theta, h_1)$  на изотерме  $T_1$  и величина  $\Delta S_{вз}$ . Если изостеры линейны и условия (11) соблюдаются, то уравнение (13) можно считать точным. Величина  $\Delta S_{вз}$  в общем случае нам неизвестна, однако уравнение (13) допускает два приближенных решения при  $\Delta S_\Theta = 0$  и при  $\Delta S_{вз} = 0$ . Если предположить, что  $\Delta S_{вз} - R \ln \Theta = 0$ , то мы получим уравнение

$$\ln h_2 = (T_1/T_2) \ln h_1 \text{ при } \Theta = const, \quad (14)$$

которое представляет собой условие температурной инвариантности характеристической кривой и позволяет вычислять температурную зависимость изотерм адсорбции для данной области  $\Theta$ , в которой выполняется условие  $\Delta S_{вз} = R \ln \Theta$ .

$\Theta = const$ , и на основании уравнения (9) можно показать, что

$$q_\Theta = \varepsilon - T(d\varepsilon/dT)_\Theta, \quad (10)$$

где  $q_\Theta$  – аналог чистой изостерической теплоты адсорбции, вычисляемый вдоль линии  $\Theta = const$ . Можно доказать, что если в координатах  $\lg p, T^{-1}$  изостеры адсорбции ( $a = const$ ) линейны, то линии  $\Theta = const$  в тех же координатах будут также прямыми. В сравнительно узком интервале температур  $T_1 - T_2$ , в котором изостеры линейны, величины  $q_\Theta$  и  $\Delta S_\Theta$ , в первом приближении, не зависят от  $T$ , т.е.:

$$q_\Theta = const, \Delta S_\Theta = const, \quad (11)$$

а поэтому для двух температур  $T_1$  и  $T_2$  можно написать

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + (T_2 - T_1)\Delta S_\Theta. \quad (12)$$

Подставив в уравнение (12) значение  $\Delta S_\Theta$  из уравнения (8), после преобразований получим при  $\Theta = const$

Рассмотрим теперь второе возможное приближенное решение при  $\Delta S_{вз} = 0$ . Проведенные нами вычисления  $\Delta S_{вз}$  в зависимости от  $\Theta$  для ряда систем показали, что во многих случаях энтропия взаимодействия мала во всем интервале  $\Theta$ , и в уравнении (13) величиной  $\Delta S_{вз}$  можно пренебречь. При условии  $\Delta S_{вз} = 0$  из уравнения (13) получим

$$\ln h_2 = (T_1/T_2) \ln h_1 + (1 - T_1/T_2) \ln \Theta. \quad (15)$$

Уравнение (15) позволяет решить задачу, поставленную во втором приближении по сравнению с уравнением (14). При больших  $\Theta$  оба уравнения дают примерно одинаковые результаты, так как величина  $\ln \Theta$  мала. При малых  $\Theta$  уравнение (14) приводит к большим относительным ошибкам в величине  $h_2$ , так как при  $\Theta \rightarrow 0$  для выполнения условия  $\Delta S_\Theta = 0$  величина  $\Delta S_{вз}$  должна стремиться к бесконечности, что не имеет физического смысла и приводит

к бесконечно большому значению начальной теплоты адсорбции. В отличие от этого уравнения (15) при  $\Theta \rightarrow 0$  дает гораздо меньшую относительную ошибку величины  $h_2$ , так как в этой области естественно пренебречь конечной и малой величиной  $\Delta S_{вз} / R$  по сравнению с  $\ln \Theta$ . Поэтому при малых  $\Theta$  уравнение (15) должно давать гораздо лучшее согласие с опытом, чем уравнение (14).

$$(E_i)_\infty = 2\pi\rho_m c_m \frac{\lambda_m (T_o - T_m)^2}{q_o} \left[ Z \left( R_o + \frac{\lambda_m (T_o - T_m)}{q_o} \right) + 4 \frac{\lambda_m^2 (T_o - T_m)_2}{q_o^2} \right]. \quad (17)$$

$$\frac{dT_o}{dT} > 0, \text{ если } \frac{q_o R_o}{\lambda_m (T_o - T_m)} > 1. \quad (18) \quad R_3 = \frac{\lambda_m (T_o - T_m)}{q_o}. \quad (19)$$

Линейный масштаб эффективного аккумулярования:

$$(E_i)_\infty = 2\pi\rho_m c_m (T_o - T_m) R_3 [Z(R_o + R_3) + 4R_3^2]. \quad (20)$$

В этих уравнениях  $R_3$  – термическое сопротивление грунта;  $Z$  – рабочая высота теплообменника.

**Выводы.** Комбинированная технология получения электроэнергии, теплоты и холода позволяет расширить круг предприятий, заинтересованных во внедрении систем тригенерации на основе комбинированной гелиоколлекторной установки с солнечными батареями.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. INTAS PROJECT, Reference Number: INTAS-96-1730. Alternative Refrigerating // Heat-Pumping and Air-Conditioning Systems based on the open absorption cycle and Solar Energy. 1998.
2. Амерханов Р.А., Бегдай С.Н. К проблеме энергоэффективного здания // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2005. № 2. С. 91–94.
3. Гарькавый К.А., Бегдай С.Н. Анализ эффективности микроклимата помещения // Энергосбережение и водоподготовка. 2006. № 6. С. 76–77.
4. Бегдай С.Н. Повышение тепловой эффективности одноэтажных зданий с гелиоколлектором. автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Волгоград, 2008. 18 с.
5. Гарькавый К.А., Цыганков Б.К. Анализ тенденций развития традиционных и возобновляемых источников энергии // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2014. Т. 1. № 46. С. 207–212.

В заключение приведем метод определения конечных параметров аккумулярования системы теплообменник – грунт.

Примем, что  $T \geq T_m + \Delta T$ , где  $\Delta T \rightarrow 0$

Уравнение процесса теплообмена ( $R \rightarrow \infty$ ) определяется соотношениями:

$$\left( \frac{dT_o}{dT} \right)_\infty = - \frac{q_o}{\rho_m c_m} \left[ \frac{1}{R_o} \frac{q_o}{\lambda_m (T_o - T_m)} \right], \quad (16)$$

Теплота, аккумулярованная грунтом:

6. Гарькавый К.А., Амерханов Р.А. К вопросу экономической и энергетической эффективности систем, использующих возобновляемые источники энергии // Энергосбережение и водоподготовка. 2009. № 4. С. 57–59.

7. Гарькавый К.А. Главный возобновляемый источник энергии // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 8 (148). С. 22–28.

8. Кириченко А.С. Обоснование параметров комбинированной системы солнечного тепло- и холодоснабжения Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 2015. С. 37–40

9. Амерханов Р.А., Кириченко А.С., Снисаренко В.П. Использование воздушного теплового насоса для теплоснабжения объектов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2015. № 1 (182). С. 73–79.

10. Scrosati B., Garche J. Lithium batteries: Status, prospects and future // Journal of Power Sources. 195 (2010), 2419–2430

11. Амерханов Р.А., Богдан А.В., Кириченко А.С., Куличкина А.А., Чечерин М.О., Скороход А.А. Система геотермального теплохладоснабжения // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 53. С. 203–209.

12. Амерханов Р.А., Кириченко А.С. Обоснование параметров комбинированной системы солнечного тепло- и холодоснабжения зданий // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2015. № 9 (165). С. 62–65.

13. Weinreich B., Zehner M. Dimensioning aids in practice - a comparison // Sun, Wind Energy. 2009. № 12. P. 88–96.

14. Ertmer K. Expansion tanks and valves specialists abound // Sun, Wind Energy. 2010. № 9. P. 98–102.

15. Lamp P., Ziegler F. European research on solar-assisted air conditioning // Int. J. Refrig, 1998. Vol. 21. № 2.

16. Гарькавый К.А., Цыганков Б.К. Энергетические ресурсы России // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2014. № 4 (179). С. 46–52.

---

**Begdai S.N., Storozhuk T.A.**

**ABSORPTION REFRIGERATING UNITS IN THE SYSTEMS OF TRIGENERATION**

*To date, not all of the buildings and structures that can be built are fully able to be provided with grid energy resources. Failures to issue technical specifications began to multiply, along with the price for connection increased. The solution to this problem can be gas piston or gas turbine installations. Provided that the energy balance of the building has been correctly calculated and appropriately approached the use of energy resources, that is, the load is at an acceptable level for this unit. These installations can provide the building with heat, cold and electricity at relatively low material costs. It is not advantageous to use these installations in the off-season when the internal temperature regime corresponds to the outdoor temperature, at which time it is advisable to use network resources.*

**Key words:** solar collector, absorption refrigerating machine, trigeneration.

---

**Бегдай Станислав Николаевич**, доцент кафедры ЭТ и ВИЭ.

Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина.

Адрес: 350044, Краснодар, ул. Калинина, д. 13.

E-mail: 219bs@mail.ru

**Сторожук Татьяна Александровна**, доцент кафедры МЖ и БЖ.

Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина.

Адрес: Россия, 350044, Краснодар, ул. Калинина, д. 13.

E-mail: k08@mail.ru