

Научная статья  
УДК 620.9:44.41.29  
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-58-64>

## **Алгоритмы управления сливом воды с целью поддержания уровня воды в абсорбере посредством регулятора давления**

**Константин Викторович Долгий<sup>1</sup>, Александр Николаевич Дядик<sup>2</sup>,  
Николай Павлович Малых<sup>3</sup>✉**

<sup>1-3</sup>*Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,  
Санкт-Петербург, Россия, malyh@smtu.ru✉*

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы регулирования уровня заборной воды в абсорбере, предназначенном для удаления углекислого газа из смеси с водородом. И понижение, и повышение уровня воды в абсорбере приводит к снижению эффективности его работы, при этом давление в абсорбере должно быть постоянным в различных режимах функционирования. Основную функцию по поддержанию требуемого уровня воды принимает на себя питательный клапан. Предложена функциональная схема канала управления питательным клапаном от регулятора давления с сигналом задания, корректируемым по уровню воды в абсорбере. С использованием программного средства LabVIEW выполнены расчеты изменения двенадцати параметров абсорбера на типовых режимах работы при давлении внешней воды 0,5 и 1,6 МПа. Полученные результаты подтвердили возможность использования способа управления для поддержания уровня воды в абсорбере в заданных пределах. Исследуется регулирование уровня воды в абсорбере с коррекцией сигнала задания регулятору давления по сигналам от ограничительных регуляторов верхнего и нижнего уровней воды в абсорбере. Рекомендуется корректировать сигнал заданного давления по условиям изменения уровня за установленные пределы, увеличивая или уменьшая его в зависимости от выхода уровня за верхний или нижний допустимые пределы, для повышения продолжительности и точности поддержания назначенного давления в абсорбере. Сделаны выводы о возможности увеличения продолжительности поддержания назначенного давления в абсорбере за счет изменения конструктивных характеристик абсорбера: увеличения объема емкости абсорбера, заполненной водой, увеличения диапазона допустимого изменения уровня воды.

**Ключевые слова:** риформинг, углекислый газ, водород, абсорбер, уровень воды, питательный клапан, давление, расход, регулятор давления, привод насоса, сигнализатор, датчик давления

**Для цитирования:** Долгий К. В., Дядик А. Н., Малых Н. П. Алгоритмы управления сливом воды с целью поддержания уровня воды в абсорбере посредством регулятора давления // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 2. С. 58–64. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-58-64>.

Original article

## **Algorithms of controlling water discharge for maintaining water level in absorber by using pressure regulator**

**Konstantin V. Dolgiy<sup>1</sup>, Alexandr N. Dyadik<sup>2</sup>, Nikolai P. Malykh<sup>3</sup>✉**

<sup>1-3</sup>*Saint-Petersburg State Marine Technical University,  
Saint-Petersburg, Russia, malyh@smtu.ru✉*

**Abstract.** The article considers the problems of regulating the seawater level in the absorber for removing carbon dioxide from a hydrogen mixture. Decreasing or increasing the water level in the absorber lead to its low operation efficiency, the pressure in the absorber being constant in various modes of operation. The feed valve's main function is to maintain the necessary water level. There has been given a functional diagram of the channel controlling the feed valve from the pressure regulator with a task signal adjusted by the water level in the absorber. Analysis of changing twelve parameters of the absorber under typical operating modes with the external water pressure of 0.5 and 1.6 MPa was conducted by using the LabVIEW software. The results obtained confirmed the possibility of using the control method to maintain the water level in the absorber within the specified limits. Regulating the water level in the ab-

sorber with the correction of the pressure setting signal to the pressure regulator by signals from the limiting regulators of the upper and lower water levels in the absorber is also examined. It is recommended to adjust the signal of the set pressure value, according to the level changes beyond the limits by increasing or decreasing it depending on the level going beyond the upper or lower permissible limits for increasing the duration and accuracy of maintaining the assigned pressure in the absorber. The duration of maintaining the assigned pressure in the absorber has been referred as to be increased by changing the design characteristics of the absorber: increasing the water volume in the absorber tank, increasing the range of permissible changes of the water level.

**Keywords:** reforming, carbon dioxide, hydrogen, absorber, water level, feed valve, pressure, flow rate, pressure regulator, pump drive, indicator, pressure selector

**For citation:** Dolgij K. V., Dyadik A. N., Malykh N. P. Algorithms of controlling water discharge for maintaining water level in absorber by using pressure regulator. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies. 2022;2:58-64.* (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-2-58-64>.

### Введение

В литературе [1, 2] приводится описание упрощенной имитационной модели процесса получения водорода путем риформинга дизельного топлива [3] на борту морского подводного объекта. При всех положительных качествах процесса получения водорода риформингом возникает проблема его очистки от сопутствующего углекислого газа, загрязняющего водород и способствующего выходу из строя дорогостоящих топливных элементов электрохимического генератора. Проблема вывода углекислого газа из контура топливного процессора решается растворением его в заборной воде в объеме абсорбера. Как известно [4], важной задачей, обеспечивающей безопасную работу абсорбера, является поддержание постоянного уровня воды внутри корпуса аппарата. Решению обозначенной проблемы посвящена данная работа.

### Канал управления уровнем воды в абсорбере за счет питательного клапана

Как понижение, так и повышение уровня воды в абсорбере приводит к снижению эффективности его работы. Кроме того, в абсорбере должно поддерживаться постоянное давление. В этом случае основную функцию по поддержанию требуемого уровня воды принимает на себя питательный клапан (ПК).

Схема канала управления приводом ПК представлена на рис. 1. Принцип управления ПК состоит в том, что при отсутствии изменения уровня за допустимые пределы в абсорбере поддерживается назначенное давление, обеспечивающее растворимость  $\text{CO}_2$  при установленном расходе воды  $Q_v$ .

При превышении уровнем воды установленно значения сигнал задания давления  $p_z$  уменьшается. Это приводит к уменьшению давления в абсорбере  $p_{sm}$ , в результате чего снижается отбор рабочего газа и увеличивается поступление газа в абсорбер. Масса газа в абсорбере растет, и уровень воды в нем уменьшается. После восстановления уровня воды в установленных пределах кор-

рекция давления прекращается, а в абсорбере поддерживается назначенное давление.

При уменьшении уровня воды в абсорбере ниже установленного значения сигнал задания  $p_z$  увеличивается. Соответствующее увеличение давления  $p_{sm}$  приводит к увеличению отбора рабочего газа из абсорбера и уменьшению поступления в него газа. В результате масса газа в абсорбере снижается, а уровень воды в нем растет. После восстановления уровня воды в установленных пределах коррекция давления прекращается, в абсорбере поддерживается назначенное давление.

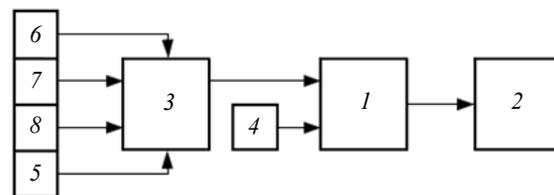


Рис. 1. Функциональная схема канала управления ПК от регулятора давления с сигналом задания, корректируемым по уровню воды в абсорбере: 1 – регулятор давления; 2 – привод регулирующего клапана; 3 – корректор сигнала задания давления; 4 – датчик давления; 5 – сигнализатор нижнего уровня; 6 – сигнализатор верхнего уровня; 7 – сигнализатор среднего уровня; 8 – задатчик давления

Fig. 1. Functional diagram of the channel of the feed valve control from the pressure regulator with a setting signal corrected according to the water level in the absorber: 1 - pressure regulator; 2 - control valve actuator; 3 - corrector of the pressure setting signal; 4 - pressure sensor; 5 - low level signaling device; 6 - upper level signaling device; 7 - medium level signaling device; 8 - pressure transmitter

Формирование сигнала задания, корректируемого по уровню воды в абсорбере, описывается следующими уравнениями:

Долгий К. В., Дядик А. Н., Мальных Н. П. Алгоритмы управления сливом воды в абсорбере посредством регулятора давления

$$flag3 = \begin{cases} 1 & \text{при } h_{verh} = 1 \quad \text{или} \quad flag3 = 1 \\ 0 & \text{при } h_{sr} = 0, \end{cases}$$

$$flag5 = \begin{cases} 1 & \text{при } h_{niz} = 1 \quad \text{или} \quad flag5 = 1 \\ 0 & \text{при } h_{sr} = 1. \end{cases}$$

При  $flag3 = 1$ :

$$\frac{d(Pz_{uv})}{dt} = sk_{uv}; \quad -2 \leq Pz_{uv} \leq 0;$$

$$sk_{uv} = \begin{cases} -skz & \text{при } h_{verh} = 1; \\ skz & \text{при } h_{verh} = 0. \end{cases}$$

При  $flag3 = 0$ :

$$Pz_{uv} = 0;$$

$$\frac{d(Pz_{um})}{dt} = sk_{um}; \quad 0 \leq Pz_{um} \leq 2;$$

$$sk_{um} = \begin{cases} skz & \text{при } h_{niz} = 1; \\ -skz & \text{при } h_{niz} = 0. \end{cases}$$

При  $flag5 = 0$ :

$$Pz_{um} = 0;$$

$$Pz_{kor} = Pz_{uv} + Pz_{um};$$

$$Pz = Pz_{vh} + Pz_{kor},$$

где  $flag3, flag5$  – логические переменные;  $h_{verh}, h_{niz}, h_{sr}$  – сигналы от сигнализаторов верхнего, нижнего и среднего уровней воды в абсорбере;  $Pz_{uv}, Pz_{um}$  – составляющие сигнала коррекции при увеличении и уменьшении уровня воды в абсорбере;  $Pz_{kor}$  – сигнал коррекции давления в абсорбере;  $Pz_{vh}$  – сигнал давления в функции уровня воды в абсорбере;  $Pz$  – выходной сигнал по давлению в абсорбере;  $sk_{uv}, sk_{um}$  – скорости изменения корректирующего сигнала при увеличении и уменьшении уровня воды в абсорбере;  $skz$  – базовая скорость изменения корректирующего сигнала.

Данные расчета изменения параметров абсорбера на типовых режимах его работы представлены на рис. 2 и 3.

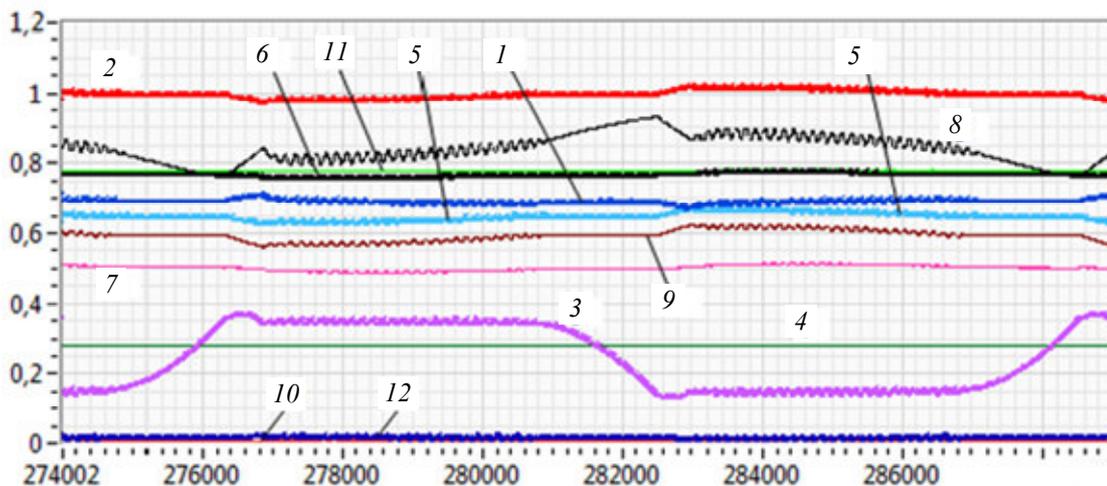


Рис. 2. Регулятор давления с коррекцией задания по уровню при давлении внешней воды 0,5 МПа:  
 1 – относительный объемный расход воды на входе в абсорбер; 2 – относительное давление газовой смеси в абсорбере; 3 – уровень воды в абсорбере; 4 – относительное давление внешней воды; 5 – относительный напор насоса; 6 – относительные обороты насоса; 7 – относительная мощность насоса; 8 – относительный расход газа на входе в абсорбер; 9 – относительный расход рабочего газа из абсорбера; 10 – относительное перемещение регулировочного клапана, регулирующего давление за питательным клапаном; 11 – относительное давление за питательным клапаном; 12 – относительное перемещение питательного клапана

Fig. 2. Pressure regulator with level setting correction at external water pressure = 0.5 MPa:  
 1 - relative volume flow rate of water at the absorber inlet; 2 - relative pressure of the gas-water mixture in the absorber;  
 3 - water level in the absorber; 4 - relative pressure of external water; 5 - relative head of the pump;  
 6 - relative speed of the pump; 7 - relative power of the pump; 8 - relative gas flow rate at the absorber inlet;  
 9 - relative consumption of working gas from the absorber; 10 - relative displacement of the adjusting valve, which regulates the pressure behind the feed valve; 11 - relative pressure behind the feed valve; 12 - relative movement of the feed valve

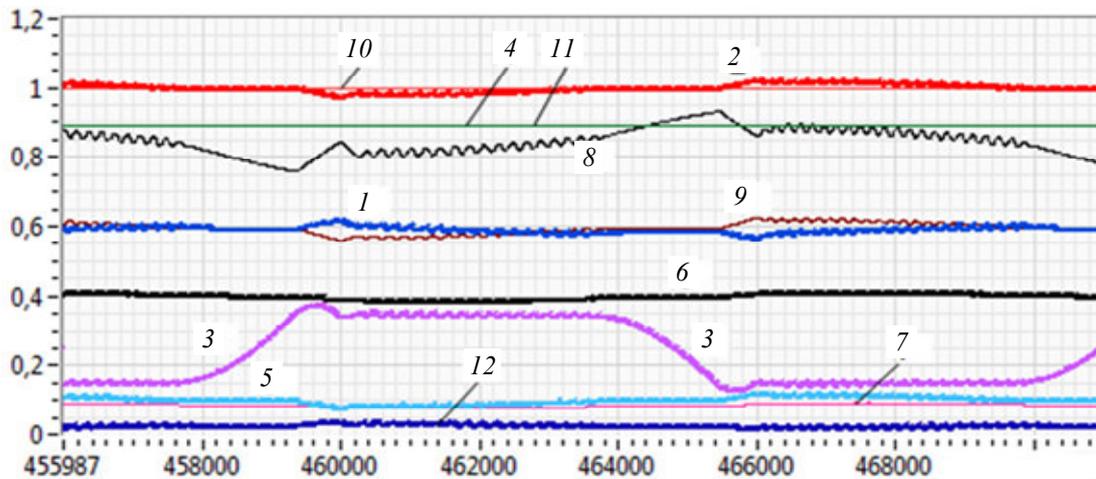


Рис. 3. Регулятор давления с коррекцией задания по уровню при давлении внешней воды 1,6 МПа:  
 1–12 – обозначения шлейфов осциллограмм (см. рис. 2)

Fig. 3. Pressure regulator with level setting correction at external water pressure = 1.6 MPa:  
 1–12 - designations of oscillogram loops (see Fig. 2)

Согласно представленным графикам использование рассматриваемого способа управления позволяет ограничить изменение уровня воды в абсорбере в установленных пределах.

**Задача управления сливом воды посредством регулятора давления**

Функциональная схема рассматриваемого варианта управления давлением представлена на рис. 4 (схема и алгоритмы функционирования ее элементов соответствуют рекомендациям в [5]).

Работа схемы происходит следующим образом. При отсутствии изменения за допустимые пределы уровня воды в абсорбере, измеряемого аналоговым датчиком уровня 11, регулятор давления 1 формирует управляющий сигнал по рассогласованию сигналов из корректора сигнала задания 9 и датчика давления 10. Этот сигнал без изменений проходит через управляемые ограничители 4 и 5 на вход привода 12 ПК. В случае превышения уровнем верхнего допустимого предела срабатывает ограничительный регулятор уровня сверху 2, сигнал из которого сравнивается с сигналом из регулятора давления 1 в управляемом ограничителе сверху 4. В результате этого сравнения на выходе ограничителя 4 формируется управляющий сигнал, равный сигналу из регулятора 1 или из ограничительного регулятора 2. В последнем случае на выходе ограничителя 4 формируется также дискретный сигнал о включении ограничительного регулятора 2, поступающий через сигнализатор 6 на вход корректора 9. Управляющий сигнал из ограничителя 4 через ограничитель 5 поступает на вход привода 12.

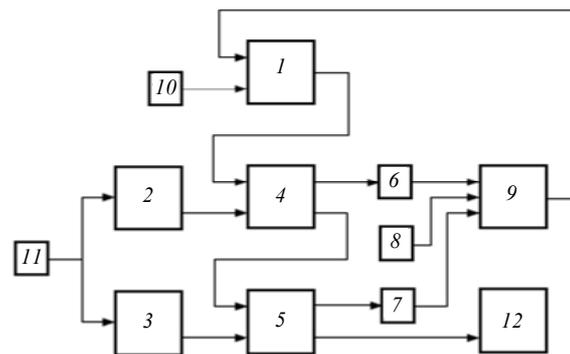


Рис. 4. Функциональная схема канала управления ПК:  
 1 – регулятор давления; 2, 3 – ограничительные регуляторы уровня сверху и снизу; 4, 5 – управляемые ограничители сверху и снизу; 6, 7 – сигнализаторы включения ограничительных регуляторов; 8 – датчик давления в абсорбере; 9 – корректор сигнала задания давления; 10 – датчик давления; 11 – датчик уровня; 12 – привод питательного клапана

Fig. 4. Functional diagram of the feed valve control channel: 1 - pressure regulator; 2, 3 - limiting level regulators from above and below; 4, 5 - controlled limiters from above and below; 6, 7 - signaling devices for switching on limiting regulators; 8 - pressure gauge in the absorber; 9 - corrector of the pressure setting signal; 10 - pressure sensor; 11 - level sensor; 12 - feed valve drive

В случае уменьшения уровня воды в абсорбере ниже минимального допустимого предела срабатывает ограничительный регулятор уровня снизу 3, сигнал из которого поступает на вход управляемого ограничителя снизу 5, где сравнивается с сигна-

лом, поступающим из ограничителя 4. По результатам сравнения на выходе ограничителя 5 формируется управляющий сигнал, равный сигналу из ограничителя 4 или из ограничительного регулятора 3. В последнем случае на выходе ограничителя 5 формируется также дискретный сигнал о включении ограничительного регулятора 2, поступающий через сигнализатор 7 на вход корректора 9.

При наличии сигналов из сигнализаторов 6 или 7 в корректоре 9 происходит коррекция сигнала задания из задатчика давления 8. В противном случае сигнал из задатчика 8 передается на вход регулятора 1 без коррекции.

Работа ограничительных регуляторов 2 и 3, управляемых ограничителями 4, 5 и корректора сигнала задания 9 описывается нижеследующими уравнениями.

Ограничительный регулятор уровня сверху:

$$\begin{aligned} del &= h_{yr} - h_{yr \max}; & h_{yr \max} &= 0,31; \\ u_{ogr \ verh} &= K_p \cdot del; & K_p &= 20; \\ 0 &\leq u_{ogr \ verh} \leq 1, \end{aligned}$$

где  $h_{yr}$ ,  $h_{yr \max}$  – сигнал от датчика уровня и уставка к срабатыванию ограничительного регулятора сверху;  $u_{ogr \ verh}$  – сигнал на выходе ограничительного регулятора;  $K_p$  – коэффициент усиления давления;  $del$  – разность текущего и максимального уровней в абсорбере.

Ограничительный регулятор уровня снизу:

$$\begin{aligned} del &= h_{yr} - h_{yr \min}; & h_{yr \min} &= 0,15; \\ u_{ogr \ niz} &= K_p \cdot del; & K_p &= 20; \\ 0 &\leq u_{ogr \ niz} \leq 1, \end{aligned}$$

где  $h_{yr \min}$  – уставка к срабатыванию ограничительного регулятора снизу;  $u_{ogr \ niz}$  – сигнал на выходе ограничительного регулятора.

Управляемый ограничитель сверху:

$$\begin{aligned} du &= u_{ogr \ verh}; \\ u_{yo \ uv} &= \begin{cases} u_{reg \ P} & \text{при } du \leq u_{reg \ P}; \\ du & \text{при } du > u_{reg \ P}; \end{cases} \\ ogr_{yv} &= \begin{cases} 0 & \text{при } du \leq u_{reg \ P}; \\ 1 & \text{при } du > u_{reg \ P}; \end{cases} \end{aligned}$$

где  $u_{yo \ uv}$  – сигнал на выходе управляемого ограничителя;  $ogr_{yv}$  – сигнал о включении ограничительного регулятора;  $du$  – приращение сигнала ограничителя уровня;  $u_{reg \ P}$  – ограничитель сигнала уровня по давлению в абсорбере.

Управляемый ограничитель снизу:

$$\begin{aligned} du &= 1 - u_{ogr \ niz}; \\ u_{yo \ um} &= \begin{cases} u_{yo \ uv} & \text{при } du \leq u_{yo \ uv}; \\ du & \text{при } du > u_{yo \ uv}; \end{cases} \\ ogr_{ym} &= \begin{cases} 0 & \text{при } du \leq u_{yo \ uv}; \\ 1 & \text{при } du > u_{yo \ uv}; \end{cases} \end{aligned}$$

где  $u_{yo \ um}$  – сигнал на выходе управляемого ограничителя;  $ogr_{ym}$  – сигнал о включении ограничительного регулятора.

Корректор сигнала задания:

$$\begin{aligned} sk &= \begin{cases} -skz & \text{при } ogr_{yv} = 1; \\ 0 & \text{при } ogr_{yv} = 0 \text{ и } ogr_{ym} = 0; \\ skz & \text{при } ogr_{ym} = 1, \end{cases} \\ \frac{d(u_{kor})}{dt} &= sk; & skz &= 0,002; \\ Pz_{kor} &= Pz + u_{kor}, \end{aligned}$$

где  $Pz$ ,  $Pz_{kor}$  – заданное и откорректированное значения сигнала задания регулятору давления;  $u_{kor}$  – корректирующий сигнал;  $skz$ ,  $sk$  – заданная и фактическая скорости коррекции сигнала задания.

Работа системы управления с рассматриваемым вариантом управления проиллюстрирована на рис. 5.

Сравнение рис. 5 с рис. 2 и 3 свидетельствует о том, что оба варианта управления обеспечивают примерно одинаковый характер изменения параметров абсорбера. Во втором случае (рис. 5) осциллограммы изменения параметров имеют более гладкий вид благодаря формированию управляющих сигналов с помощью аналогового датчика уровня. При этом структура второго варианта более сложная.

Улучшение условий растворения  $CO_2$  во внешней воде, подаваемой в абсорбер, может быть достигнуто при управлении отбором воды из абсорбера посредством сигналов от регулятора давления, ограничиваемых по условиям сохранения требуемого уровня воды в абсорбере.

Для повышения продолжительности и точности поддержания назначенного давления в абсорбере рекомендуется корректировать сигнал заданного давления по условиям изменения уровня за установленные пределы, увеличивая или уменьшая его в зависимости от выхода уровня за верхний или нижний допустимые пределы.

Продолжительность поддержания назначенного давления в абсорбере может быть также увеличена за счет изменения конструктивных характеристик абсорбера: увеличения объема емкости абсорбера, заполненной водой, и увеличения диапазона допустимого изменения уровня воды.

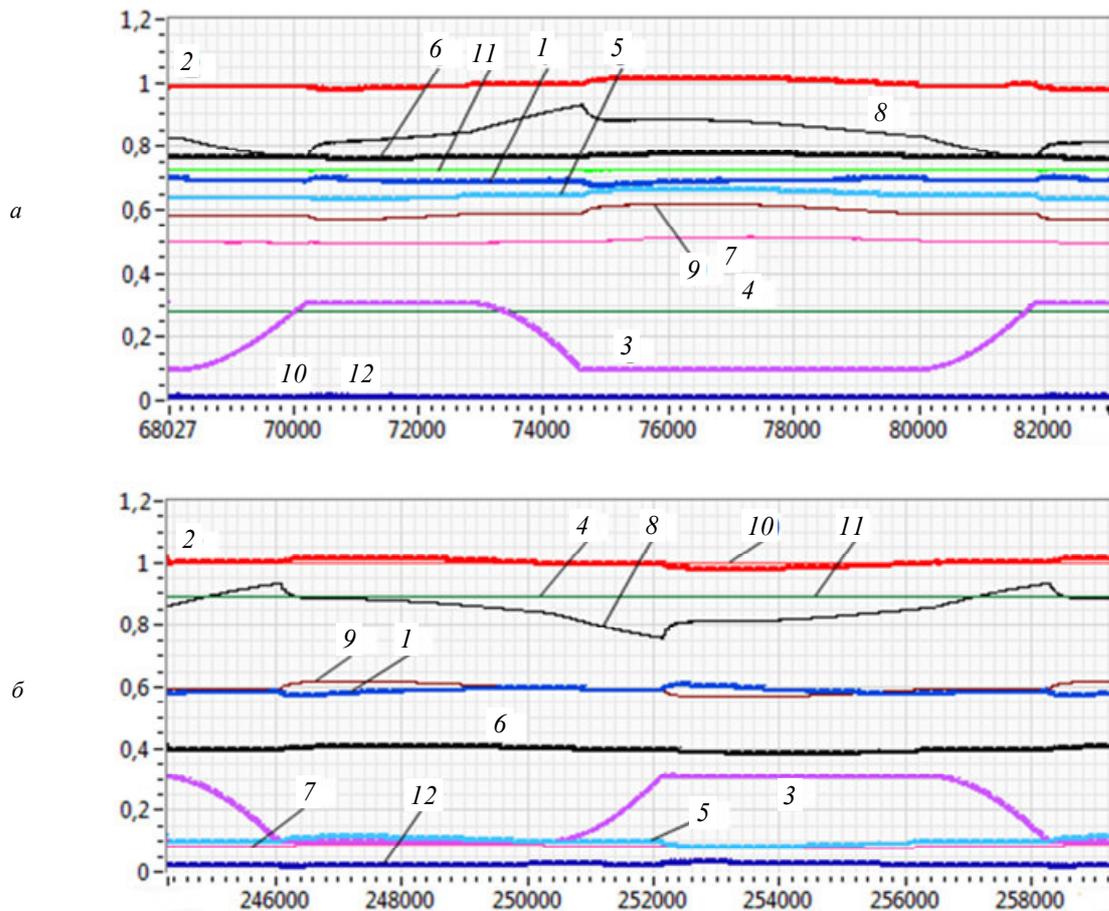


Рис. 5. Управление ПК от регулятора давления с использованием ограничительных регуляторов уровня:  
 а – при давлении внешней воды 0,5 МПа; б – при давлении внешней воды 1,6 МПа;  
 1–12 – обозначения шлейфов осциллограмм (см. рис. 2)

Fig. 5. Control of the feed valve from the pressure regulator using limiting level regulators:  
 а - at an external water pressure of 0.5 MPa; б - at an external water pressure of 1.6 MPa;  
 1–12 - designations of oscillogram loops (see Fig. 2)

### Заклучение

Процесс растворения углекислого газа, находящегося в смеси продуктового газа, в абсорбере реализуется подачей заборной воды. При этом возможны колебания уровня воды в корпусе абсорбера. Устанавливаются нижний и верхний предельные уровни воды, которые определяются отсутствием срыва насоса и увлажнением рабочего водорода. Предложенная схема регулирования

уровня в абсорбере предусматривает работу питающего насоса по показаниям регулятора давления в корпусе абсорбера. Улучшение условий растворения  $\text{CO}_2$  во внешней воде, подаваемой в абсорбер, может быть достигнуто при управлении отбором воды из абсорбера посредством сигналов от регулятора давления, ограничиваемых согласно условиям сохранения требуемого уровня воды в абсорбере.

### Список источников

1. Дядик А. Н., Балакин А. В., Кармазин А. С., Ларионов М. В., Сурин С. Н. Упрощенная имитационная модель топливного процессора в составе воздухонезависимых энергетических установок // Мор. интеллектуал. технологии. 2020. № 4 (50). Т. 1. С. 244–249.
2. Дядик А. Н., Балакин А. В., Кармазин А. С., Ларионов М. В., Сурин С. Н. Разработка принципиальных

схем очистки водорода от углекислого газа // Мор. вестн. 2020. № 4 (76). С. 81–84.

3. Ченцов М. С., Соколов В. С., Прохоров Н. С. Концепция установки получения водорода риформингом дизельного топлива в составе атмосферонезависимой энергетической установки с электрохимическими генераторами для неатомной подводной лодки // Водород. энергетика и трансп. 2006. № 11 (43). С. 39–46.

4. *Лаптев А. Г.* Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2007. 500 с.

5. *Балакин А. В., Богданов Д. С., Дядик А. Н.* Технология отработки систем управления блоком очистки

воздухонезависимой энергетической установки с использованием имитационного моделирующего комплекса // *Мор. интеллектуал. технологии.* 2015. № 4 (30). Т. 2. С. 52–56.

#### References

1. Diadik A. N., Balakin A. V., Karmazin A. S., Larionov M. V., Surin S. N. Uproshchennaia imitatsionnaia model' toplivnogo protsessora v sostave vozdukhonezavisimyykh energeticheskikh ustanovok [Simplified simulation model of fuel processor as part of air-independent power plants]. *Morskie intelektual'nye tekhnologii*, 2020, no. 4 (50), vol. 1, pp. 244-249.

2. Diadik A. N., Balakin A. V., Karmazin A. S., Larionov M. V., Surin S. N. Razrabotka printsipial'nykh skhem oshistki vodoroda ot uglekislogo gaza [Developing schematic diagrams of hydrogen purification from carbon dioxide]. *Morskoi vestnik*, 2020, no. 4 (76), pp. 81-84.

3. Chentsov M. S., Sokolov V. S., Prokhorov N. S. Kontsepsiia ustanovki polucheniia vodoroda riformingom dizel'nogo topliva v sostave atmosferonezavisimoi energeticheskoi ustanovki s elektrokhimicheskimi generatorami dlia

neatomnoi podvodnoi lodki [Concept of hydrogen producing plant by reforming diesel fuel as part of atmospheric-independent power plant with electrochemical generators for non-nuclear submarine]. *Vodorodnaia energetika i transport*, 2006, no. 11 (43), pp. 39-46.

4. Laptev A. G. *Modeli pogrannichnogo sloia i raschet teplomassoobmennykh protsessov* [Boundary layer models and analysis of heat and mass transfer processes]. Kazan', Izd-vo Kazanskogo un-ta, 2007. 500 p.

5. Balakin A. V., Bogdanov D. S., Diadik A. N. Tekhnologiya otrabotki sistem upravleniia blokom oshistki vozdukhonezavisimoi energeticheskoi ustanovki s ispol'zovaniem imitatsionnogo modeliruiushchego kompleksa [Technology for testing control systems for cleaning unit of air-independent power plant using simulation modeling complex]. *Morskie intelektual'nye tekhnologii*, 2015, no. 4 (30), vol. 2, pp. 52-56.

Статья поступила в редакцию 03.03.2022; одобрена после рецензирования 26.04.2022; принята к публикации 05.05.2022  
The article was submitted 30.03.2022; approved after reviewing 26.04.2022; accepted for publication 05.05.2022

#### Информация об авторах / Information about the authors

**Константин Викторович Долгий** – аспирант кафедры теплофизических основ судовой энергетики; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; kon8917@yandex.ru

**Александр Николаевич Дядик** – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой теплофизических основ судовой энергетики; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; dyadik@rambler.ru

**Николай Павлович Мalykh** – кандидат технических наук; доцент кафедры теплофизических основ судовой энергетики; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; malykh@smtu.ru

**Konstantin V. Dolgiy** – Postgraduate Student of the Department of Thermal Fundamentals of Ship Power Engineering; Saint-Petersburg State Marine Technical University; kon8917@yandex.ru

**Alexandr N. Dyadik** – Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Thermal Fundamentals of Ship Power Engineering; Saint-Petersburg State Marine Technical University; dyadik@rambler.ru

**Nikolai P. Malykh** – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Thermal Fundamentals of Ship Power Engineering; Saint-Petersburg State Marine Technical University; malykh@smtu.ru

