

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В КАЧЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО РАСТВОРИТЕЛЯ МАСЛЯНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ СУДОВЫХ СИСТЕМ

А.И. Бубнова — АО «Научно-исследовательское проектно-технологическое бюро «Онега», г. Северодвинск, Россия. ORCID: 0009-0000-0820-1606. Эл. почта: ai.bubnova@mail.ru (для переписки)

Е.Н. Гарьянов — АО «Научно-исследовательское проектно-технологическое бюро «Онега», г. Северодвинск, Россия. ORCID: 0009-0003-9095-9361. Эл. почта: kojifri@mail.ru

М.В. Меркулов — АО «Научно-исследовательское проектно-технологическое бюро «Онега», г. Северодвинск, Россия. ORCID: 0009-0008-1783-2432. Эл. почта: planetorion@yandex.ru

Н.Н. Фетюкова — АО «Научно-исследовательское проектно-технологическое бюро «Онега», г. Северодвинск, Россия. ORCID: 0000-0003-3227-1756. Эл. почта: fetyukova2012@yandex.ru

К.Н. Куликов — Филиал ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», г. Северодвинск, Россия. ORCID: 0009-0006-4417-7344. Эл. почта: kkulikov@onegastar.ru

©2025 г. Поступила в редакцию 23.07.2027 г. Прошла рецензирование 27.08.2025 г.
Принята к публикации 27.08.2025 г.

В статье представлена экологически чистая и экономически эффективная система очистки трубопроводов судовых систем от масляных и эксплуатационных загрязнений с использованием в качестве растворителя сверхкритического диоксида углерода (СК-СО₂). Описана технологическая схема очистки трубопроводов от масляных загрязнений с эффективностью очистки до 97 %. Применение установки отмывки трубопроводов с использованием в качестве моющего агента СК-СО₂ упрощает процесс очистки внутренних поверхностей трубопроводов различной длины, диаметра и конфигурации, значительно сокращает время ремонтно-восстановительных работ, снижает трудоемкость, обеспечивает минимизацию образующихся в результате очистки жидких маслосодержащих отходов, снижает материальные и энергетические затраты на их переработку.

К л ю ч е в ы е с л о в а: сверхкритический диоксид углерода, масляные и эксплуатационные загрязнения трубопроводов.

ВВЕДЕНИЕ

Трубопроводы судовых систем должны быть очищены от масляных и эксплуатационных загрязнений, чтобы соответствовать требованиям, предъявляемым к их чистоте.

В настоящее время для очистки внутренних поверхностей трубопроводов от масляных и эксплуатационных загрязнений применяют водные растворы моющих средств и эмульгаторов. Процесс включает в себя подключение трубопроводов к стенду гидродинамической очистки, последовательное выполнение операций: очистка обезжиривающим раствором, промывка водой, сушка

сжатым воздухом. Существенные недостатки такого подхода — высокая трудоемкость из-за многоэтапности и образование большого количества загрязненных отработанных растворов, вредных для окружающей среды [1].

Цель научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы — разработка экологически чистой и экономически эффективной системы очистки трубопроводов от масляных и эксплуатационных загрязнений с использованием сверхкритических сред.

Специалистами АО «НИПТБ «Онега» предложен способ очистки трубопроводов с помощью нетоксичного, негорючего, взрывобезопасного, экологически безопасного, доступного и недорогого СК-СО₂. Данный метод применим не только в судостроительной промышленности, но и в других отраслях, где требуется очистка трубопроводов [2].

Диоксид углерода в СК-состоянии обладает следующими характеристиками:

- химическая инертность и отсутствие окислительной активности;
- низкая вязкость (до 100 раз ниже, чем у жидкостей);
- высокий коэффициент диффузии (в 100 раз выше, чем у жидкостей);
- высокая растворяющая способность;
- низкая плотность по сравнению с плотностью жидкой фазы.

Эти свойства позволяют СК-СО₂ эффективно проникать в труднодоступные места сложных по форме изделий и растворять загрязняющие вещества, а именно низкомолекулярные неполярные органические соединения, например масла [3].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

На базе ФГАОУ ВО «САФУ им. Ломоносова» (г. Архангельск) совместно со специалистами лаборатории Центра коллективного пользования «Научного оборудования «Арктика» была проведена экспериментальная работа по исследованию методов отмычки трубопроводов судовых систем от масляных загрязнений сверхкритическими средами [1].

Для проведения опытной работы был выбран фрагмент трубопровода судовой системы прямой конфигурации диаметром 10 мм и длиной 250 мм, загрязненный отфильтрованным отработанным компрессорным маслом К-12 ГОСТ 1861-73. Принципиальная схема экспериментальной установки для промывки трубопровода представлена на рис. 1.

Загрязненный фрагмент трубопровода помещали в блок термостата. Диоксид углерода из баллона подавали в трубопровод насосом высокого давления, в котором его охлаждали до +2,5 °С. Диоксид углерода проходил через стальной капилляр (диаметр 0,75 мм), помещенный вместе с фрагментом трубопровода в блок термостата для предварительного нагрева. Экстракт подвергали декомпрессии в автоматическом регуляторе давления. В связи с сильным охлаждением диоксида углерода при декомпрессии и необходимостью получения раствора масла для последующего анализа, в газовый поток вводили домывающий растворитель (ССl₄) и смесь подогревали в проточном нагревателе до +30 °С. Поток газообразного диоксида углерода, раствора целевых компонентов в ССl₄ и масла поступал в стеклянный сепаратор (сосуд-сборник), где происходило их разделение: диоксид углерода улетучивался в атмосферу, а раствор масла выпадал в осадок.

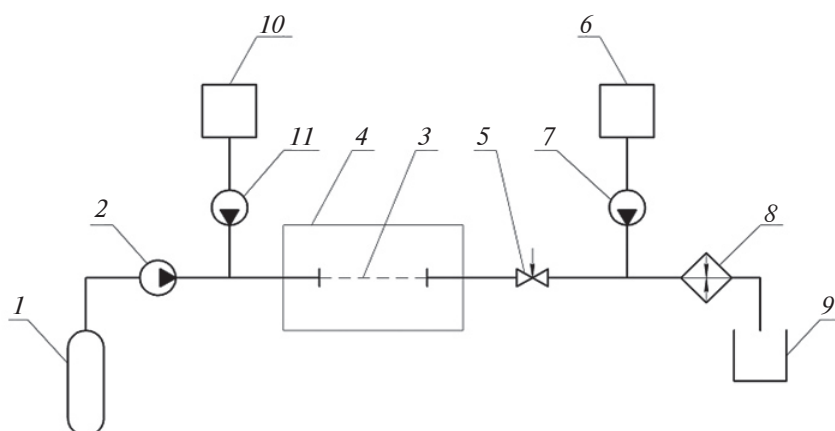


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки для промывки трубопровода: 1 — баллон с диоксидом углерода; 2 — насос диоксида углерода; 3 — загрязненный фрагмент трубопровода; 4 — термостат; 5 — автоматический регулятор давления; 6 — емкость с домывающим растворителем (CCl_4); 7 — насос подачи домывающего растворителя; 8 — проточный нагреватель; 9 — приемник экстракта; 10 — емкость соразтворителя; 11 — насос подачи соразтворителя

Исследования эффективности промывки проводили при следующих режимах:
 — давление: 6, 10, 15, 20 МПа;
 — температура: + 20, + 40, + 60 °С;
 — объемная скорость подачи диоксида углерода: 5, 10, 15 мл/мин.

В табл. 1 представлены выборочные результаты промывки трубопроводов.

После проведения отмывки диоксидом углерода трубу промывали избытком CCl_4 для определения остаточного содержания масла. Получаемый в ходе отмывки раствор масла в CCl_4 объемом 20 мл анализировали методом ИК-спектроскопии.

По результатам выполненного исследования были сделаны следующие выводы:

- увеличение температуры оказывает незначительное влияние на интенсификацию процесса очистки;
- применение жидкого (околокритического) диоксида углерода при давлениях 15 и 20 МПа, температуре +20 °С и продолжительности промывки не менее 45 мин обеспечивает степень очистки трубопровода от масляных загрязнений до 83 %;
- применение СКФ-диоксида углерода при давлениях 15 и 20 МПа и продолжительности промывки не менее 45 мин при температуре +40 °С обеспечивает степень очистки трубопровода до 97 %.

Таблица 1

Результаты очистки трубопроводов

№ опыта	Расход, мл/мин	T, °С	P, МПа	Состояние углекислого газа	Степень очистки, %/мин				
					5	10	15	30	45
1	10	20	15,0	Жидкий	13,5	27,3	36,9	57,3	69,6
2		20	20,0	Жидкий	23,2	34,0	63,5	64,6	83,3
3		40	15,0	СКФ	32,9	56,1	64,5	79,2	91,1
4		40	20,0	СКФ	27,5	62,8	81,5	92,6	97,6

загрязнения собирают на фильтре. Цикл повторяют до полной очистки загрязненного фрагмента трубопровода от масляных и механических загрязнений.

Контроль состояния среды на различных участках установки обеспечивают с помощью сигнализаторов уровня среды в баках, тензодатчиков, датчиков давления, системой автоматики. Безопасность работы обеспечивают организационными мерами (размещением баллонного оборудования вне помещений), оборудованием установки разрывными мембранами и предохранительными клапанами.

Анализ содержания остаточного масла в системе осуществляют люминесцентным методом.

Устойчивый турбулентный режим течения рабочей среды в трубопроводе способствует интенсификации процесса обезжиривания труб. Значение критерия Рейнольдса при этом должно составлять $Re > 10\,000$. Проведем расчеты для определения минимальной скорости потока и минимального расхода. Выбираем параметры СК-СО₂ при температуре 308 К и давлении 12 МПа, согласно литературным данным [6].

Рассчитаем кинематическую вязкость по формуле:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho},$$

где $\eta = 6,636 \cdot 10^{-4}$ г/см²·с, $\rho = 768,4$ кг/м³; тогда $\nu = 8,6 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

Минимальную скорость потока рассчитывают по формуле:

$$\nu_{\min} = \frac{Re \cdot \nu}{D},$$

где число Рейнольдса $Re = 10\,000$, кинематическая вязкость $\nu = 8,6 \cdot 10^{-7}$ Па·с, диаметр трубопровода $D = 0,032$ м.

Следовательно, минимальная скорость устойчивого турбулентного потока для СК-СО₂ в трубопроводе при $Re = 10\,000$, диаметре трубопровода 0,032 м и динамической вязкости $6,636 \cdot 10^{-4}$ г/см²·с составляет 0,27 м/с.

Определим минимальный расход рабочей среды:

$$Q = \pi R^2 \nu_{\min}, \text{ где } R = D/2 = 0,016 \text{ м; тогда } Q = 0,78 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Таким образом, минимальная скорость СК-СО₂ составляет 0,27 м/с, а минимальный расход $Q = 0,78$ м³/ч при числе Рейнольдса 10000.

Определим критическую (минимальную) скорость рабочей среды, при которой возможно вовлечение и перенос механических частиц. Для стэнда отмывки трубопроводов необходимо подобрать насос, учитывая значения не только минимального, но и рационального расхода рабочей среды в трубопроводе. Определим рациональный расход для горизонтального участка. Предполагается, что конструкция стэнда обеспечивает горизонтальное расположение отмываемого изделия. Определим критическую скорость потока [8]:

$$\nu_{\text{кр}} = K \sqrt{\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} g D},$$

где $K = 1,01 \dots 1,5$ — значения опытной константы; ρ_2, ρ_1 — соответственно плотности частицы и моющей рабочей среды, кг/м³; g — ускорение свободного падения, равное 9,8 м/с²; D 0,032 м — диаметр трубопровода.

Таблица 2

Результаты вычислений значений плотности

ρ , кг/м ³	P , МПа	T , К	Фаза	$v_{кр}$, м/с	Q , м ³ /ч
768,4	12	308	Сверхкритическая	1,69	4,9
810	12	303	Жидкая	1,64	4,7
879	12	293	Жидкая	1,57	4,55

Рациональный расход рабочей среды [7]: $Q = \pi R^2 v_{кр}$.

Поскольку плотность диоксида углерода в околоскритической области может значительно меняться, выполним вычисления для нескольких значений плотности.

Исходя из расчетов, вовлечение механических частиц в поток большей плотности происходит при меньшей скорости рабочей среды стенда и вымывание частиц энергоэффективнее выполнять жидким диоксидом углерода. Отсюда предполагаем, что обезжиривание на стенде происходит при скорости потока 0,27 м/с и расходе 0,78 м³/ч, а вымывание механических частиц — при скорости потока 1,57 м/с и расходе 4,55 м³/ч.

Для реализации проекта, исходя из полученных в ходе расчета характеристик, был выбран погружной вихревой насос скважинного типа, размещаемый в баке с диоксидом углерода.

Несмотря на существующие сложности, специалистами АО «НИПТБ «Онега» была: разработана технологическая схема установки с реализацией циклического процесса промывки трубопроводов; выполнен подбор комплектующего оборудования российского производства, способного обеспечить работоспособность и требуемую надежность установки с соблюдением необходимых параметров рабочей среды (давление 12 МПа, температура +35 °С, номинальная производительность установки от 0,8 м³/ч до 5,0 м³/ч).

Отметим следующие конкурентные преимущества, которыми обладает предложенный способ:

- сокращение продолжительности ремонтно-восстановительных работ;
- простота процесса очистки трубопроводов различной длины, диаметра и конфигурации;
- уменьшение стоимости промывки трубопроводов;
- снижение негативного воздействия на окружающую среду;
- продление срока службы оборудования;
- снижение трудоемкости и стоимости ремонтных работ;
- обеспечение минимизации образующихся в результате очистки жидких маслосодержащих отходов;
- снижение материальных и энергетических затрат на их переработку;
- возможность применения на судоремонтных предприятиях.

В настоящее время в судостроительной промышленности Российской Федерации отсутствуют аналоги оборудования технологии очистки трубопроводов судовых систем. Однако на судоремонтных предприятиях существует производство диоксида углерода и станции его очистки, что создает основу для внедрения новой технологии. Применение сверхкритического диоксида углерода взамен традиционных растворителей имеет значительный потенциал

и позволяет рассматривать данную технологию очистки как одну из приоритетных в судостроительной отрасли.

Для решения ключевой задачи российского судостроения — создания эффективного флота — необходимо рассматривать и развивать нестандартные и результативные технологии выполнения работ. Это позволит сократить сроки выполнения работ и обеспечить положительный экономический эффект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданов Г.А., Соснина Ю.Н., Попова А.С., Мотыженкова Е.А. Перспективная технология отмывки трубопроводов судовых систем от масляных загрязнений сверхкритическими средами // Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика А.Н. Крылова. 2018. № 2018-1. С.163.
2. Соснина Ю.Н., Поспелова А.В., Куликов К.Н. // Патент РФ № 2699628.
3. Залепугин Д.Ю., Тилькунова Н.А., Чернышова И.В., Поляков В.С. // Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика. 2006. Т. 1. № 1. С. 27.
4. ОСТ 5.9646-85 Единая система защиты от коррозии и старения. Арматура судовая. Консервация и расконсервация (до монтажа). Типовые технологические процессы.
5. ОСТ В5.9519-85 Системы корабельные специальные. Чистота и обезжиривание. Технические требования и типовой технологический процесс.
6. Linstrom P. NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database 69 // National Institute of Standards and Technology. 1997. DOI 10.18434/T4D303.
7. Соловьёв Б.В. Очистка судовых систем от технологических загрязнений. Ленинград: Судостроение, 1977. 76 с.
8. Стенин В.А. Математическое моделирование промывки гидравлических систем // Вестник Череповецкого государственного университета. 2016. № 4. С. 46.

APPLICATION OF SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE AS AN ALTERNATIVE SOLVENT FOR OIL AND OPERATIONAL CONTAMINANTS IN PIPELINES OF SHIP SYSTEMS

A.I. Bubnova — JSC «NIPTB «Onega», Severodvinsk, Russia. ORCID: 0009-0000-0820-1606. E-mail: ai.bubnova@mail.ru (*for correspondence*)

E.N. Garyanov — JSC «NIPTB «Onega», Severodvinsk, Russia. ORCID: 0009-0003-9095-9361. E-mail: kojifri@mail.ru

M.V. Merkulov — JSC «NIPTB «Onega», Severodvinsk, Russia. ORCID: 0009-0008-1783-2432. E-mail: planetorion@yandex.ru

N.N. Fetyukova — JSC «NIPTB «Onega», Severodvinsk, Russia. ORCID: 0000-0003-3227-1756. E-mail: fetyukova2012@yandex.ru

K.N. Kulikov — Branch of the «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov», Severodvinsk, Russia. ORCID: 0009-0006-4417-7344. E-mail: kkulikov@onegastar.ru

This article presents an environmentally friendly and cost-effective system for cleaning oil and operational contaminants from marine pipelines using supercritical carbon dioxide as a solvent. A process flow diagram for cleaning oil contaminants from pipelines with a cleaning efficiency of up to 97 % is described. Using a pipeline cleaning system using supercritical carbon dioxide as a cleaning agent simplifies the process of cleaning the internal surfaces of pipelines of various lengths, diameters, and configurations, significantly

Применение сверхкритического диоксида углерода в качестве альтернативного растворителя масляных и эксплуатационных загрязнений трубопроводов судовых систем

reduces repair and restoration time, reduces labor intensity, minimizes liquid oil-containing waste generated during cleaning, and reduces the material and energy costs of processing it.

K e y w o r d s: supercritical carbon dioxide, oil and operational contaminants in pipelines.

REFERENCES

1. *Bogdanov G.A., Sosnina Yu.N., Popova A.S., Motyzhenkova E.A.* Promising Technology for Cleaning Ship Systems Pipelines from Oil Contaminants Using Supercritical Media // Proceedings of the Central Research Institute named after Academician A.N. Krylov. 2018. No 2018-1. P. 163.
 2. *Sosnina Yu.N., Pospelova A.V., Kulikov K.N.* // Patent RF No 2699628.
 3. *Zalepugin D.Yu., Tilkunova N.A., Chernyshova I.V., Polyakov V.S.* // Sverkhkriticheskie Flyuidy: Teoriya i Praktika. 2006. Vol. 1. No 1. P. 27 (in Russ).
 4. OST 5.9646-85 Unified system of protection against corrosion and aging. Ship fittings. Preservation and de-preservation (before installation). Typical technological processes.
 5. OST V5.9519-85 Special ship systems. Cleanliness and degreasing. Technical requirements and a typical technological process.
 6. *Linstrom P.* NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database 69 // National Institute of Standards and Technology. 1997. DOI 10.18434/T4D303
 7. *Solovyov B.V.* Cleaning of Ship Systems from Technological Contaminants. Leningrad: Sudostroenie, 1977. 76 p.
 8. *Stenin V.A.* // Bulletin of Cherepovets State University. 2016. No 4. P. 46.
-
-