

# К вопросу разработки глушителей шума реактивной струи

Калабухов В.Н. 

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, г. Самара, Российская Федерация; kalabyhov@mail.ru;

Поступила: 06.09.2024

Рассмотрена: 24.10.2024

Принята: 25.11.2024

Научная статья



**Аннотация.** В настоящей работе анализируются результаты исследований акустических характеристик дозвуковых реактивных струй при воздействии на них высокочастотного шума. В качестве основного устройства, генерирующего высокочастотный звук, рассматривалась система, состоящая из периферийных сопел, расположенных вокруг основного (базового) сопла. Выявлено, что звуковое облучение оказывает существенное влияние на аэродинамические и акустические характеристики дозвуковых турбулентных струй.

**Ключевые слова:** шум; дозвуковая турбулентная струя; когерентные структуры; звуковое облучение; акустический глушитель.

## Введение

Работы, проводимые двигателестроительными фирмами и научно-исследовательскими центрами, привели к созданию целого ряда эффективных газотурбинных установок (ГТУ). Данный факт обусловил широкое применение ГТУ в энергетике, морском и наземном транспорте. Например, в «Белой книге» [1] холдинга «РЖД» с целью увеличения эффективности предусмотрено сокращение удельных затрат на потребляемое тепловозами топливо. Для этого предполагается замещение дизельного топлива природным газом на величину 25 % к 2030 году путем перехода на эксплуатацию газотурбовозов. В частности, на российских железных дорогах началась эксплуатация отечественного газотурбовоза ГТ1h. Установка на газотурбовозе достаточно легкой и компактной ГТУ НК-361 позволило решить проблему создания мощного автономного локомотива. Мощность газотурбовоза ГТ1h более чем в три раза выше, чем у стандартных тепловозов. Однако использование ГТУ влечет за собой рост внешнего шума.

Анализ результатов эксплуатационных испытаний газотурбовоза ГТ1h-002 с силовой установкой НК-361 [2] позволил определить минимальные требования к ГТУ, позволяющие повысить эффективность использования газотурбовозов. В числе этих требований снижение уровня внешнего шума до 87 дБ [3].

Например, основным источником внешнего шума тепловозов является шум струи отработавших газов дизеля, достигающий уровня 120–140 дБ. Для снижения уровня этого шума применяют механические глушители, которые в основном рассекают поток и приводят к его резкому торможению. При этом растет противодавление в глушителе, и, как результат, двигатель теряет мощность. Однако из опыта разработки выходных устройств турбореактивных двигателей (ТРД) известно, что основная задача выходного устройства ТРД — это обеспечение пропускной способности, поддерживающей требуемую согласно термодинамическому расчету оптимальную рабочую линию совместной работы вентилятора и газогенератора для получения максимального КПД этих узлов, т. е. минимального удельного расхода топлива. Такая задача решается выбором эффективной площади сопла с учетом коэффициента расхода, равного отношению действительного расхода газа к идеальному расходу. Таким образом, для эффективного снижения шума выхлопа ГТУ требуются методы шумоглушения, не ухудшающие рабочую линию совместной работы вентилятора и газогенератора.

## 1. Теоретические основы исследования

Закономерности образования шума дозвуковых турбулентных струй изучены достаточно подробно теоретически и экспериментально [4–5]. Так, общепризнано наличие в турбулентных струях когерентных структур — крупномасштабных периодических вихревых образований, развивающихся и взаимодействующих друг с другом на фоне мелкомасштабной турбулентности. Когерентные структуры могут излучать шум в процессах их образования, роста, слияния и разрушения в конце начального участка. Зависимость когерентных структур от начальных условий истечения, их чувствительность к периодическим возмущениям позволяют управлять аэродинамическими и акустическими характеристиками турбулентных струй.

Весьма эффективным является метод управления турбулентностью в струйных течениях путем воздействия на их когерентные структуры [6–7]. Так, высокочастотное звуковое облучение при числе Струхала  $St = \frac{fd}{v} = 2...5$  приводит к ослаблению турбулентного смешения в начальном участке, уменьшению характерного масштаба турбулентности в слое смешения и, как следствие этого, к снижению широкополосного шума струи.

Работы по исследованию влияния акустического облучения реактивной струи на процесс развития турбулентности в струе начались в ЦАГИ в конце 70-х годов прошлого века. Было показано, что звуковое облучение оказывает существенное влияние на аэродинамические и акустические характеристики дозвуковых турбулентных струй. Впоследствии эти исследования были распространены на сверхзвуковые струи [6].

В настоящей работе исследуются акустические характеристики дозвуковых реактивных струй при воздействии на них высокочастотного шума. В качестве основного устройства, генерирующего высокочастотный звук, рассматривалась система, состоящая из периферийных сопел, расположенных вокруг основного (базового) сопла. Диаметр периферийных сопел был на порядок меньше диаметра основного сопла. Скорость истечения периферийных струй равнялась скорости истечения газа из основного сопла. Если диаметр периферийных струй в 10 раз меньше диаметра основной струи  $d_2 = d_1/10$ , то  $f_2 = 10f_1$ . Следовательно, число Струхала, определенное по диаметру и скорости основной струи и частоте  $f_2$  воздействующего на основную струю звука, будет составлять  $St = \frac{f_2 d_1}{v} = 10 \frac{f_1 d_1}{v} = 2...5$ , т. е. шум, генерируемый периферийными струями, воспринимается основной струей как высокочастотное возбуждение.

## 2. Этапы разработки устройств шумоглушения дозвуковой реактивной струи

Исследования на горячих струях устройств, реализующих акустический метод снижения шума дозвуковой реактивной струи, были осуществлены в заглушенной камере. На моделях исследовалось влияние конструктивных элементов на эффективность шумоглушения струйной системой (струйный глушитель), включающей в себя базовое сопло и периферийные сопла, расположенные по окружности вокруг базового сопла. Испытания в заглушенной камере проходили в несколько этапов. Результаты акустических испытаний сразу пересчитывались на полетные условия натурного двигателя с диаметром сопла 1,06 м.

Модельная установка первого и второго этапа исследований (см. рис.) состояла из базового сопла диаметром  $D = 80$  мм и периферийных сопел (трубопроводов) диаметром  $d$ , расположенных по периметру базового сопла.

Периферийные сопла питались через коллектор. На данной установке исследовалось влияние конструктивных параметров на эффективность глушения струи. Рассматривались следующие конструктивные параметры: количество периферийных сопел  $n$ ; диаметр периферийных сопел  $\bar{d} = \frac{d}{D}$ ; осевое  $\bar{x} = \frac{x}{D}$  удаление периферийных сопел, здесь  $x$  — расстояние между плоскостями срезов основного сопла и периферийных сопел; радиальное  $\bar{H} = \frac{H}{D}$  — удаление периферийных сопел, здесь  $H$  — удаление оси периферийного сопла от кромки среза основного сопла.

При испытаниях струйной системы выдерживалось постоянство термодинамических параметров. Так, температура продувочного воздуха на входе в базовое сопло поддерживалась

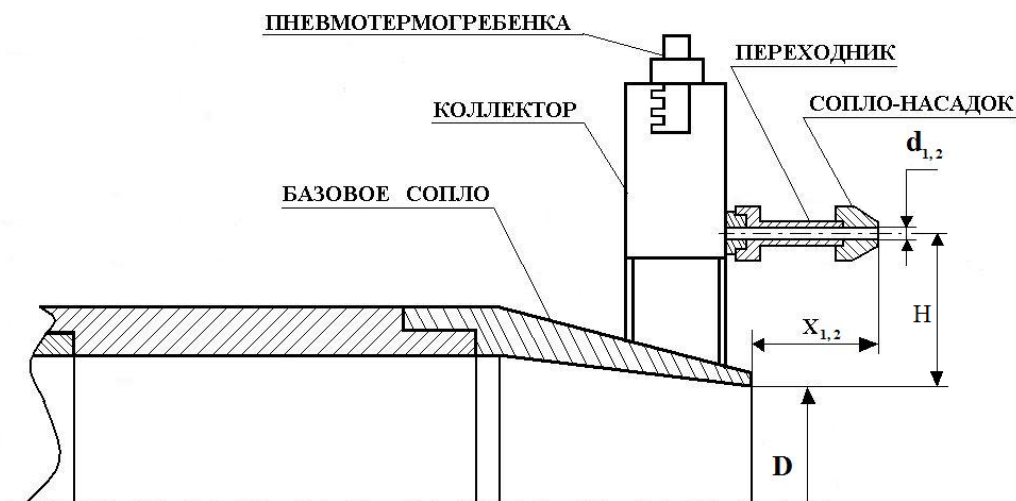


Рис.. Модельная установка  
 Fig.. Model installation

равной  $T_c = 468 \pm 1^0 \text{ K}$ . Отношение полного давления на срезе периферийных сопел к статическому давлению  $\pi_k = 1,95$ . Для базового сопла эта величина составляла  $\pi_c = 1,9$ . Результаты модельных экспериментальных исследований первого этапа пересчитывались в уровни воспринимаемого шума (EPНдБ) для контрольной точки «набор высоты».

Влияние диаметра и количества, периферийных сопел на шум струйной системы исследовалось с периферийными соплами диаметрами:  $\bar{d} = 0,046$ ,  $\bar{d} = 0,094$  и  $\bar{d} = 0,119$ . При испытаниях плоскости среза периферийных сопел совпадали с плоскостью среза базового сопла  $\bar{x} = 0$ , при этом радиальное удаление составляло  $\bar{H} = 0,225$ .

Варьирование количеством  $n$  для периферийных сопел диаметром  $\bar{d} = 0,046$  эффекта не дало. В данном случае число Струхали, определенное по диаметру  $D$  и скорости  $v_1$  основной струи и частоте  $f_2$  воздействующего на основную струю звука, составляло  $St = 5...10$ , что выходит за рамки диапазона  $St = 2...5$ .

Для периферийных сопел диаметром  $\bar{d} = 0,094$  эффект снижения шума увеличивался с ростом числа периферийных сопел. Число Струхали, определенное по диаметру  $D$  и скорости  $v_1$  основной струи и частоте  $f_2$  воздействующего на основную струю звука, в этом случае составляло  $St = 2...5$ . При  $n = 4$  была получена эффективность 0,3 EPНдБ, при  $n = 9$  эффективность составила 0,4 EPНдБ, а при  $n = 12$  эффективность возросла до 1,2 EPНдБ. Для сопел  $\bar{d} = 0,119$  тенденция снижения уровня шума струйной системы по сравнению с шумом базового сопла сохранилась. Глушитель в такой компоновке снижает шум реактивной струи в контрольной точке «набор высоты» на 1,5 EPНдБ.

Третий этап экспериментальных исследований, как и предыдущий этап, был связан с поиском конструктивных параметров, обеспечивающих максимальное снижение шума струи. Среди конструктивных параметров оставался один параметр, роль которого в снижении шума до конца не была установлена на первом и втором этапе. Это — осевое удаление периферийных сопел.

Испытания в заглушенной камере проходили на горячих струях ( $T = 460...480^0 \text{ K}$ ). При этом соблюдалось равенство перепада давления в сопле и коллекторе  $\pi_c = \pi_k = 2,1$ . Для оценки эффективности шумоглушения в каждой серии испытаний проводились продувки базового сопла диаметром  $D = 80 \text{ мм}$ .

Испытания третьего этапа осуществлялись с периферийными соплами диаметром  $\bar{d} = \frac{d}{D} = 0,071; 0,091; 0,121; 0,14$ , что позволили получить эффективность для контрольной точки «взлет» — 2,2 EPНдБ.

Результаты испытаний моделей струйного глушителя позволили проработать ряд конструкций малошумных выходных устройств ГТД — например, глушитель шума реактивной струи [8], содержащий основное сопло диаметром  $D$ , расположенные вокруг него периферийные сопла диаметром  $d = (0,07...0,17) D$  и эжектор диаметром  $D_{\text{э}}$  со звукопоглощающей конструкцией. Длина части эжектора, выходящая за срез многотрубчатого сопла, выполняется равной  $L = \frac{D_{\text{э}} - D}{2K} + K(d + l)$ , где  $l$  — расстояние от кромки основного сопла до кромки периферийного сопла; коэффициент  $K = 0,12...0,29$ .

### 3. Обсуждение результатов исследования

Результаты первого этапа исследований на горячих струях показали.

1. Величина приведенной площади раскрытия периферийных сопел равная  $\bar{F} \approx 12...17 \%$ , соответствует максимальным эффективности снижения шума струи. Причем увеличение приведенной площади раскрытия периферийных сопел в случае использования периферийных сопел диаметром, соответствующим диапазону чисел Струхала  $St = 2...5$ , эффективно как за счет увеличения диаметра  $\bar{d}$  периферийных сопел, так и за счет увеличения числа  $n$  периферийных сопел.

2. Верхняя граница диапазона радиального удаления периферийных сопел, соответствующего максимальным эффективности снижения шума струи, равна  $\bar{H} \approx 0,5$ .

3. Максимальную эффективность показала следующая компоновка струйного глушителя: основное сопло диаметром  $D$ ; периферийные сопла диаметром  $\bar{d} = 0,119$ ; приведенная площадь раскрытия периферийных сопел  $\bar{F} \approx 17 \%$  (число периферийных сопел  $n = 12$ ); осевое удаление периферийных сопел  $\bar{x} = 0$ ; радиальное удаление периферийных сопел  $\bar{H} = 0,375...0,5$ . Глушитель в такой компоновке снижает шум реактивной струи в контрольной точке «набор высоты» на 1,5 ЕРNdБ.

Основные результаты исследований второго этапа.

1. Диапазон радиального удаления периферийных сопел, соответствующий максимальным эффективности снижения шума струи, равен  $\bar{H} \approx 0,05...0,5$ .

2. Наиболее эффективная компоновка струйного глушителя шума реактивной струи характеризуется следующими конструктивными параметрами: относительный диаметр периферийных сопел  $\bar{d} \approx 0,1$ ; относительная площадь раскрытия периферийных сопел  $\bar{F} \approx 12 \%$  ( $n = 12$ ,  $\bar{d} = 0,1$ ) или  $\bar{F} \approx 17 \%$  ( $n = 12$ ,  $\bar{d} = 0,119$ ); относительное радиальное удаление осей периферийных сопел от кромки среза основного сопла  $\bar{H} \approx 0,05...0,5$ ; относительное осевое удаление периферийных сопел  $\bar{x} = 0$ .

3. Проведенные испытания показали следующие эффективности снижения шума при условии сохранения равенства тяг, площадей и компенсации гидравлических потерь.

Компоновка шумоглушителя с периферийными соплами диаметром  $\bar{d} = 0,1$  ( $\bar{F} = 12 \%$ ):

— контрольная точка «взлет» — 1,5 ЕРNdБ.

Компоновка шумоглушителя с периферийными соплами диаметром  $\bar{d} = 0,119$  ( $\bar{F} = 17 \%$ ):

— контрольная точка «взлет» — 2,2 ЕРNdБ;

Проведенный анализ результатов исследований третьего этапа позволил установить диапазон осевого удаления периферийных сопел, обеспечивающий максимальные эффективности шумоглушения. Этому диапазону соответствуют значения  $\bar{x}_2 \approx 0,5...1$ .

### Заключение

Исследования в области снижения авиационного шума [9] показали, что наиболее оптимальными являются комбинированные системы шумоглушения. Данный факт объясняется тем, что человеческое ухо испытывает наибольший дискомфорт от шума в диапазоне частот 1–6,3 кГц. Таким образом, системы, снижающие шум в узком диапазоне частот, являются менее эффективными по сравнению с комбинированными шумоглушителями.

Опыт разработки глушителей шума выходных устройств ГТУ показывает, что использование новых материалов и методов [10], появившихся в последние десятилетия, способно привести к существенному прогрессу в области снижения шума ГТУ.

**Информация о конфликте интересов:** автор и рецензенты заявляют об отсутствии конфликта интересов.

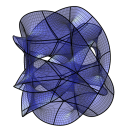
**Цитирование.** Калабухов В.Н. К вопросу разработки глушителей шума реактивной струи // Вестник Самарского университета. Естественная серия / Vestnik of Samara University. Natural Science Series. 2024. Т. 30, № 4. С. 46–52. DOI: 10.18287/2541-7525-2024-30-4-46-52.

© Калабухов В.Н., 2024

Вадим Николаевич Калабухов (kalabukhov@mail.ru) – кандидат технических наук, доцент кафедры математического моделирования в механике, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 34.

## Литература

- [1] Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга). Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 17.04 2018 г. № 769 р. Москва: ОАО «РЖД», 2018. 128 с. URL: <https://zsrd.rzd.ru/api/media/resources/c/17/121/18071?action=download>.
- [2] Бабков Ю.В., Прохор Д.И., Котяев Д.В., Грачев Н.В., Чернышев М.А. Газотурбинные двигатели как силовые установки тягового подвижного состава, работающего на сжиженном природном газе // Бюллетень результатов научных исследований. 2021. № 3. С. 55–65. DOI: <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2021-3-55-65>. EDN: <https://www.elibrary.ru/zbcbk>.
- [3] ГОСТ Р 50951-2006. Внешний шум магистральных и маневровых тепловозов. Нормы и методы измерений. Москва: Издательство стандартов, 2006. 15 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293741/4293741195.htm>.
- [4] Zaman K.B.M.Q., Hussain A.K.M.F. Turbulence suppression in free shear flows by controlled excitation // Journal of Fluid Mechanics. 1981. Vol. 103. P. 133–159. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112081001274>.
- [5] Смольяков А.В. Шум турбулентных потоков: монография. Санкт-Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2005. 312 с. ISBN 5-900703-90-8. URL: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_002826010](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_002826010).
- [6] Гиневский А.С., Власов Е.В., Колесников А.В. Акустическое управление турбулентными струями. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 240 с. ISBN 5-9221-0161-7. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24056721>. EDN: <https://www.elibrary.ru/uglgqz>.
- [7] Пимштейн В.Г. О скорости конвекции возмущений в турбулентных струях при аэроакустических взаимодействиях // Прикладная механика и техническая физика. 2007. Т. 48, № 5 (285). С. 21–25. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17249467>. EDN: <https://www.elibrary.ru/onmfqj>.
- [8] Калабухов В.Н. Разработка акустических глушителей шума реактивной струи // Динамика и виброакустика машин: материалы третьей международной научно-технической конференции, 29 июня – 01 июля 2016 г. Самара: Самарский университет, 2016. С. 148–149.



- [9] Халецкий Ю.Д. Эффективность комбинированных глушителей шума авиационных двигателей // Акустический журнал. 2012. Т. 58, № 4. С. 556–562. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17745813>. EDN: <https://www.elibrary.ru/oyiqar>.
- [10] Патент 203 05 25 Российская Федерация, МПК6 Е 04 В 1/84, 1/86. Способ изоляции шума / А.В. Генералов, В.Н. Калабухов. № 494874/63; заявл. 24.06.91; опубл. 10.03.95. URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2030525C1\\_19950310?ysclid=m5qq7dhz83718212287](https://yandex.ru/patents/doc/RU2030525C1_19950310?ysclid=m5qq7dhz83718212287).

DOI: 10.18287/2541-7525-2024-30-4-46-52

# Experience in developing jet noise silencers

Kalabukhov V.N. 

Samara National Research University, Samara, Russian Federation; [kalabyhov@mail.ru](mailto:kalabyhov@mail.ru);

Received: 06.09.2024

Revised: 24.10.2024

Accepted: 25.11.2024

Scientific article



**Abstract.** In this paper, we investigate the acoustic characteristics of subsonic jet streams exposed to high-frequency noise. The main device generating high-frequency sound was a system consisting of peripheral nozzles located around the main (base) nozzle. It was shown that sound irradiation has a significant effect on the aerodynamic and acoustic characteristics of subsonic turbulent jets.

**Key words:** noise; subsonic turbulent jet; coherent structures; sound irradiation; acoustic silencer.

**Information about the conflict of interests:** the author and reviewers declared no conflicts of interest.

**Citation.** Kalabukhov V.N. Experience in developing jet noise silencers. *Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya / Vestnik of Samara University. Natural Science Series*, 2024, vol. 30, no. 4, pp. 46–52. DOI: 10.18287/2541-7525-2024-30-4-46-52. (In Russ.)

© Kalabukhov V.N., 2024

Vadim N. Kalabukhov ([kalabyhov@mail.ru](mailto:kalabyhov@mail.ru)) – Candidate of Technical Sciences, assistant professor of the Department of Mathematical Modeling in Mechanics, Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation.

## References

- [1] Strategy for scientific and technological development of the Russian Railways holding company for the period up to 2025 and for the future up to 2030 (White Paper). Approved by the order of the Russian Railways JSC dated 17.04.2018 No. 769 p. Moscow: OAO «RZhD», 2018, 128 p. Available at: <https://zszd.rzd.ru/api/media/resources/c/17/121/18071?action=download>. (In Russ.)
- [2] Babkov Yu.V., Prokhor D.I., Kotyayev D.V., Grachev N.V., Chernyshev M.A. Gas turbine engines used as power units for traction rolling stock fueled by liquefied natural gas. *Bulletin of Scientific Research Results*, 2021, no. 3, pp. 55–65. DOI: <https://doi.org/10.20295/2223-9987-2021-3-55-65>. EDN: <https://www.elibrary.ru/zbcbkbc>. (In Russ.)
- [3] GOST R 50951-2006. External noise of mainline and shunting diesel locomotives. Standards and measurement methods. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 2006, 15 p. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293741/4293741195.htm>. (In Russ.)
- [4] Zaman K.B.M.Q., Hussain A.K.M.F. Turbulence suppression in free shear flows by controlled excitation. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, vol. 103, pp. 133–159. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112081001274>.

- [5] Smolyakov A.V. Noise of turbulent flows: monograph. Saint Petersburg: TsNII im. akad. A.N. Krylova, 2005, 312 p. ISBN 5-900703-90-8. Available at: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_002826010](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_002826010). (In Russ.)
- [6] Ginevskii A.S., Vlasov E.V., Kolesnikov A.V. Acoustic control of turbulent jets. Moscow: FIZMATLIT, 2001, 240 p. ISBN 5-9221-0161-7. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24056721>. EDN: <https://www.elibrary.ru/uglgqz>. (In Russ.)
- [7] Pimshtein V.G. Disturbance convection velocity in turbulent jets under aeroacoustic excitation. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2007, vol. 48, issue 5, pp. 636–640. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10808-007-0081-0>. EDN: <https://www.elibrary.ru/lktovj>. (In English; original in Russian)
- [8] Kalabukhov V.N. Development of acoustic silencers of jet stream noise. In: *Dynamics and vibroacoustics of machines: Proceedings of the third international scientific and technical conference, June 29–July 1, 2016*. Samara: Samarskii universitet, 2016, pp. 148–149. (In Russ.)
- [9] Khaletskiy Y.D. Effectiveness of combined aircraft engine noise suppressors. *Acoustical Physics*, 2012, vol. 58, issue 4, pp. 510–515. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063771012040094>. EDN: <https://www.elibrary.ru/rgajlb>. (In English; original in Russian)
- [10] Patent 203 05 25 Russian Federation, IPC6 E 04 B 1/84, 1/86. Generalov A.V., Kalabukhov V.N. Method for noise insulation. No. 494874/63; declared 24.06.91; published 10.03.95. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2030525C1\\_19950310?ysclid=m5qq7dhz83718212287](https://yandex.ru/patents/doc/RU2030525C1_19950310?ysclid=m5qq7dhz83718212287). (In Russ.)