

СУМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Полонский Александр Дмитриевич

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА  
В ЖИДКИХ СРЕДАХ

01.04.01 - техника физического эксперимента,  
физика приборов, автоматизация исследований

*А. Д. Полонский*

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

СУМГ - 1994

Диссертацией является рукопись.

№В 31.319

Работа выполнена в Сумском государственном университете.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
Володченко Григорий Семенович, Сумский государственный универ-  
ситет, г. Сумы;

Научный консультант – кандидат технических наук, доцент  
Дорошков Александр Валентинович, Сумский государственный уни-  
верситет, г. Сумы.

Официальные оппоненты:

– доктор физико-математических наук, профессор  
Кулиш Виктор Васильевич, Сумский государственный университет,  
г. Сумы;

– кандидат физико-математических наук, старший научный со-  
трудник Борискин Александр Иванович, Сумский институт прикладной  
физики, г. Сумы.

Ведущая организация АО "СЕЛМИ" (п/о "Электрон") г. Сумы.

Защита диссертации состоится "08" декабря 1994 г.  
в 15 часов на заседании специализированного совета  
К22.01.01 в Сумском государственном университете (244007, г. Сумы,  
ул. Римского-Корсакова, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сумского  
государственного университета.

Автореферат разослан 04 ноября 1994г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
К22.01.01, к.ф.-м.н.

Александр Яковлевич Флат

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00777215 (Т)

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

АВ - 31.319

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время для контроля физико-химических свойств жидких сред широко используются ультразвуковые приборы, принцип действия которых основан на измерении скорости звука в исследуемой среде. Высокоточные и быстродействующие измерители скорости звука необходимы для решения целого ряда фундаментальных и прикладных задач: изучения структуры и характеристик гидрофизических полей океана (полей температуры, солености и т.д.); изучения характера движения тел в жидких средах; исследования теплообменных процессов и т.п.

Особенно высокие требования по быстродействию и точности предъявляются к измерителям скорости звука, применяемым для контроля мелкомащтабной пространственно-временной изменчивости физико-химических свойств жидких сред.

Однако, указанные характеристики известных измерителей скорости звука не удовлетворяют потребителей. Как показывает анализ публикаций, предпринимаемые попытки к решению задачи повышения быстродействия и точности измерений путем совершенствования только аппаратной части, ограничиваются уровнем развития элементной базы и современного состояния приборостроения.

В то же время применение в составе приборов средств вычислительной и микропроцессорной техники существенно меняет подход к проектированию и появляется возможность достижения требуемых параметров при ограниченных возможностях современной элементной базы.

В связи с этим, решение задачи повышения быстродействия и точности измерений скорости звука в жидких средах становится возможным в результате комплексного подхода как к информационно-измерительной микропроцессорной системе, а именно:

- повышение точности измерений за счет совершенствования ап-

паратной части;

- повышение быстродействия и точности измерений за счет применения микропроцессорных вычислительных устройств;
- повышение точности измерений за счет применения совершенных алгоритмов обработки информации.

Такой подход к решению задачи повышения быстродействия и точности измерений скорости звука в жидких средах требует решения задачи синтеза системы измерений, что представляет собой практический интерес и является актуальной научной проблемой.

Цель работы. Целью настоящей работы является повышение информативности и точности измерений, путем разработки как принципиально новых методов и устройств для измерения скорости звука, так и разработки алгоритмических методов контроля физико-химических параметров жидких сред, для которых скорость звука и ее пространственно-временная изменчивость сама по себе является объектом исследований.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- проведен сравнительный анализ методов измерения скорости звука с позиций достижения наибольшей точности и быстродействия;
- на основании теоретического анализа синтезированы устройства для системы измерения скорости звука, функционирующие в реальном масштабе и обладающие повышенными метрологическими характеристиками;
- рассчитаны оценки погрешности измерений;
- получены математические модели процесса измерения скорости звука в форме пространства состояний. Полученные модели служат основой для получения оценок параметров процесса измерений скорости звука методом фильтрации Калмана;
- предложен алгоритмический метод компенсации погрешности

измерений на базе фильтра Калмана;

- исследованы вопросы сходимости, точности и определения вычислительных затрат при микропроцессорной реализации предложенных алгоритмов.

Практическая ценность заключается в следующем:

- разработаны пути построения быстродействующих и высокоточных устройств и систем измерения скорости звука в реальном времени;

- получены математические модели процесса измерений скорости звука, на базе которых показана возможность повышения точности измерений методом Калмана;

- разработан алгоритм, позволяющий уменьшить разрядность аппаратной части с 20 до 14 бит без снижения точности измерений;

- найдены и реализованы алгоритмы оценки скорости звука в виде программного обеспечения в системе команд микропроцессора серии КР580.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Республиканской школе-семинаре "Опыт создания и эксплуатации робототехнических комплексов и гибких производственных систем в машино- и приборостроении (г. Сумы, 1988 г.); Второй научно-технической конференции "Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах и конверсии производств" (г. Хмельницкий, 1993 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации содержатся в четырех докладах и трех депонированных статьях.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 136 страницах машинописного текста, перечня используемой литературы из 123 наименований и приложения на 16 страницах. Работа иллюстрирована 32 рисунками и 2 таблицами на 32 страницах.

Автор защищает:

- систему и ее основные блоки для измерения скорости звука в жидких средах;
- микропроцессорный алгоритм измерений на основе время-импульсного метода преобразования информации;
- микропроцессорные алгоритмы идентификации измерений на основе метода Калмана.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы исследований, отмечена практическая направленность работы, приведена ее структура.

В первой главе рассмотрены существующие методы измерения скорости звука. Проанализированы возможности технической реализации существующих методов измерений. На основании критического обзора существующих методов и устройств измерения выделены актуальные вопросы теоретических и экспериментальных исследований по разработке системы измерений скорости звука в жидких средах. Сделан вывод о том, что наиболее приемлемым (с точки зрения диапазона измерений) является импульсно-циклический метод измерений. Показаны преимущества применения импульсно-циклического метода измерений и проанализированы причины, сдерживающие его развитие. В конце главы сделан выбор направления исследования и сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе получены основные теоретические соотношения, описывающие процессы формирования сигнала в импульсно-циклических системах. Найденные основные соотношения между параметрами излучающего и приемного электроакустических преобразователей; определены требования к параметрам импульсного возбуждения и приема для переходного режима работы с учетом обеспечения требуемой точности измерений. На основании анализа преобразования информации в акустическом тракте показано, что вследствие интерференции

онного взаимодействия прямого и многократноотраженных от поверхностей излучающего и приемного электроакустических преобразователей излучающих колебаний, точность измерения скорости звука зависит от величины коэффициента отражения. Показано, что уменьшение коэффициента отражения приводит к увеличению диапазона измерений и к снижению разрешающей способности (крутизны преобразования). Рассмотрены пути повышения точности и разрешающей способности за счет осуществления в импульсно-циклической системе синхронизации генератора-формирователя импульсов излучения по моменту первого перехода через ноль сигнала на приемном электроакустическом преобразователе.

Третья глава посвящена разработке методов и устройств повышения точности измерений. На основе корреляционного метода обработки информации получен алгоритм функционирования и структура устройства синхронизации при использовании способа привязки по пересечению нуля. Учитывая наличие изменений амплитуды сигнала на выходе акустического тракта, а также низкую помехоустойчивость элементной базы устройства синхронизации, предложена система стабилизации амплитуды на основе временной автоматической регулировки усиления. Получены алгоритм функционирования и структура системы временной автоматической регулировки усиления. Исследованы вопросы устойчивости, определены требования к элементам системы стабилизации амплитуды с учетом обеспечения требуемого быстродействия и точности измерений.

На основе проведенных исследований путей синхронизации и стабилизации амплитуды предложен первичный преобразователь информации системы измерений скорости звука в жидких средах, обладающий повышенными метрологическими характеристиками.

Период  $T(t)$  следования выходных импульсов в рассматриваемом преобразователе зависит от расстояния  $l$  между излучающим и

приемным преобразователями, величины скорости звука  $C(t)$  и дополнительного запаздывания сигнала  $\tau_{\partial}$  в акустическом и электронных трактах:

$$T(t) = \frac{e}{C(t)} + \tau_{\partial} \quad (1)$$

Частота, соответственно, равна

$$F(t) = \frac{1}{T(t)} = \frac{C(t)}{1 + \tau_{\partial} C(t)} \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) получены алгоритмы определения скорости звука в виде:

$$C(t) = \frac{e F(t)}{1 - F(t) \tau_{\partial}} \approx e F(t) [1 + F(t) \tau_{\partial}] \quad (3)$$

$$C(t) = \frac{e}{T(t) - \tau_{\partial}} \approx [e / T(t)] [1 + \tau_{\partial} / T(t)] \quad (4)$$

Здесь учтено, что  $\tau_{\partial} \ll T(t)$ , а  $F(t) \tau_{\partial} \ll 1$ .

Анализируя алгоритмы (3) и (4), видно, что наличие дополнительного запаздывания  $\tau_{\partial}$  сигнала в акустическом и электронном трактах приводит к появлению систематической ошибки измерений

$$\delta_c = [1 + F(t) \tau_{\partial}] = [1 + \tau_{\partial} / T(t)] \quad (5)$$

которую возможно минимизировать вычислительным путем. Это предполагает включение в состав системы измерений микропроцессорного вычислительного устройства и аппаратуры для преобразования информации.

В работе проведен анализ частото-импульсного и время-импульсного метода преобразования информации.

Показано, что применение аппаратуры на основе время-импульсного метода преобразования обеспечивает выигрыш по быстродействию измерений:

$$B = \frac{F_{on} \delta_c''}{F_{\tau}(t) \delta_c'} \tag{6}$$

где  $F_{on}$  - частота опорного генератора;

$$F_{\tau}(t) = \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^{t+\tau} F(t) dt \tag{7}$$

- осредненное

значение частоты выходного сигнала первичного преобразователя;

$\tau$  - время осреднения;

$\delta_c' = 1/\tau F_{\tau}(t)$  - относительная точность измерений при реализации частото-импульсного метода измерений;

$\delta_c'' = 1/\tau F_{on}$  - относительная точность измерений при реализации время-импульсного метода преобразования.

Если полагать в (6), что точностные показатели одинаковые,

т.е.  $\delta_c' = \delta_c''$ , то выигрыш тем более, чем сильнее выполняется неравенство

$$F_{on} > F_{\tau}(t).$$

С учетом (7) найдено выражение для определения скорости звука

$$C_n(t) = \frac{A}{N(t) - N_0} \quad (8)$$

где  $A$  — константа;  
 $N(t)$  — код на выходе  $n$ -разрядного счетчика, пропорциональный измеряемой скорости звука;  
 $N_0$  — код дополнительной задержки.

Выражение (8) определяет алгоритм микропроцессорной обработки информации при использовании  $n$ -разрядного счетчика. Однако, такой алгоритм требует для своей реализации повышенных аппаратурных затрат и специального программного обеспечения.

Учитывая, что для большинства жидких сред справедливо следующее неравенство

$$C_{max} \leq (1.1 - 1.2) C_{min}, \quad (9)$$

где  $C_{min}$ ,  $C_{max}$  — минимальная и максимальная скорость звука, предложен алгоритм измерений при использовании счетчика пониженной разрядности

$$C_m(t) = C_{max} \left\{ 1 + \sum_{i=1}^h (-1)^i [b(t)]^i \right\}, \quad (10)$$

где  $b(t) = \Delta N(t) / N_{min}$ ;

$$N_{min} = A / C_{max};$$

$\Delta N(t)$  — изменение кода в  $m$ -разрядном счетчике;

$m \geq \log_2 (N_{max} - N_{min})$  - число разрядов счетчика;  $m < n$ ;

$$N_{max} = A / C_{min};$$

$$h = 1 - \lg \delta c.$$

Предложенный алгоритм (IO) позволяет увеличить быстродействие и точность измерений. Показано, что повышение быстродействия достигается за счет применения счетчика пониженной разрядности, а повышение точности измерений - за счет использования вычислений по методу разложения в степенной ряд. Полученный алгоритм измерений (IO) на основе время-импульсного метода преобразований с использованием счетчика пониженной разрядности реализован в виде программного обеспечения в системе команд микропроцессора КР580.

На основе предложенных методов, алгоритмов и устройств разработан действующий макет системы измерений скорости звука в жидких средах. С целью определения технических характеристик системы измерений проведены экспериментальные исследования в лабораторных условиях на макете. Получено подтверждение правильности теоретических результатов и выводов результатами физического эксперимента. Показано, что при выполнении измерений на реальных объектах остаются неустранимыми влияния гидроакустических и гидродинамических помех на точность измерений. Минимизация влияния неустранимых шумов и помех на точность измерений возможна при идентификации процесса измерений на основе использования информации о статистических параметрах гидроакустических и гидродинамических помех и шумов.

В четвертой главе рассмотрены вопросы синтеза алгоритмов идентификации измерений скорости звука, как эффективного средства повышения точности измерений. Под идентификацией измерения скорости звука следует понимать процесс определения математической мо-

дели объекта контроля с целью оценки его статических и динамических характеристик, вектора состояния, неизвестных фазовых координат, с использованием реально действующих на входах сигналов и реакций объекта на эти сигналы. В результате анализа возможности применения алгоритмов идентификации определен класс решаемых задач:

1. Задача определения структуры и параметров объекта контроля.
2. Задача определения параметров (статических и динамических характеристик) объекта при заданной или принятой структуре.
3. Задача определения ненаблюдаемых фазовых координат, т.е. задача оценки составляющих вектора фазового состояния.

Учитывая определенные сложности, связанные с описанием акустического тракта, как четырехпольника с переменными параметрами, показано, что решая задачу определения ненаблюдаемых фазовых координат, можно повысить точность измерений. На основании анализа методов решения такого класса задач, доказано, что наиболее универсальным и подходящим методом является алгоритмы фильтрации Калмана. При рассмотрении особенностей применения метода фильтрации Калмана для решения задачи идентификации измерения скорости звука, с учетом влияния априорной информации на точность оценки измерений, получена математическая модель процесса измерений в виде системы стохастических разностных уравнений

$$\left. \begin{aligned} X(k+1) &= a X(k) + V_0(k); \\ Z(k+1) &= X(k+1) + V_n(k). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

- где  $X(k)$  - переменная состояния измерений;  
 $Z(k)$  - измеряемая координата;  
 $V_0(k)$  - заданное воздействие;

$V_H(k)$  - погрешность наблюдений;

$$a = \sum_{i=0}^{\lambda} A_i \nu^i / i \quad - \text{коэффициент системы};$$

$$A_i = 1/T_{\varphi}$$

$T_{\varphi}$  - постоянная времени;

$\nu$  - период дискретности;

$$K \equiv K \nu;$$

$$\lambda = 1 - \lg \delta_c;$$

$\delta_c$  - относительная точность измерений.

Путем анализа статистических характеристик процесса измерений с учетом полученной модели измерений (II) сформулировано математическое решение задачи синтеза

$$J = M \left[ (X(k) - \hat{X}(k))^2 \right] \rightarrow \min_{\hat{X}(k)}$$

где  $M[\cdot]$  - операция взятия математического ожидания;  
 $\hat{X}(k)$  - несмещенная оценка процесса  $X(k)$ .

Решая такую задачу методом Калмана найдена система рекуррентных разностных уравнений, которая по сути и является алгоритмом идентификации процесса измерений скорости звука

$$X(k/k) = \bar{X}(k/k-1) + K(k) [Z(k) - \bar{X}(k/k-1)];$$

$$\bar{X}(k/k-1) = a \hat{X}(k-1/k-1);$$

$$K(k) = Q(k/k-1) [Q(k/k-1) + N_0]^{-1};$$

$$Q(k/k-1) = SQ(k-1/k-1) + R;$$

$$Q(k/k) = [1 - K(k)]Q(k/k-1); Q(0/0) = R_0;$$

где	$K(k)$	- коэффициент фильтра Калмана;
	$Q(k/k-1)$	- экстраполированная ошибка фильтрации;
	$Q(k/k)$	- уточненная дисперсия ошибки искомой оценки;
	$S$	- экспериментальный коэффициент;
	$R$	- дисперсия задающего воздействия;
	$N_0$	- дисперсия погрешности наблюдения;
	$R_0$	- установившаяся ошибка фильтрации.

С использованием программы фильтрации Калмана (12) в системе команд микропроцессора КР580 моделировалось решение задачи оценки измерений скорости звука, предложенным методом синтеза алгоритмов идентификации с помощью ЭВМ СМ 1810. II. Исследованы вопросы точности оценки измерений и цифровой устойчивости алгоритмов идентификации. Показано, что по мере обработки новых данных, получаемых в результате измерений, предложенные алгоритмы идентификации на основе фильтрации Калмана, дают более точную оценку измерений и тем самым подтверждается их эффективность и возможность реализации в системе измерений скорости звука в кидких средах.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В приложении приведена часть теоретических и экспериментальных исследований:

- в П1 приведен выбор и расчет системы временной автоматической регулировки усиления с учетом требуемой точности измерений скорости звука;

- в П2 выполнено исследование влияния погрешностей время-импульсного преобразования на точность измерений скорости звука;

- в П3 исследованы точностные характеристики действующего макета системы измерений скорости звука;

- в П4 приведена программа вычисления скорости звука методом разложения в степенной ряд с использованием счетчика пониженной

разрядности;

- в П4.1 исследованы алгоритмы идентификации с учетом обеспечения требуемой точности и цифровой устойчивости фильтрации Калмана;
- в П5 приведена программа фильтрации Калмана;
- в П6 представлен акт внедрения результатов работы.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Теоретически изучены вопросы преобразования информации в импульсно-циклических системах измерения скорости звука и получены аналитические выражения, устанавливающие взаимосвязь достигнутой точности измерений с параметрами электроакустического тракта такими, как: коэффициент отражений, амплитудной и фазовой характеристиками.

2. Предложено устройство синхронизации на основе реализации алгоритма привязки по пересечению нуля. Показано, что реализация такого алгоритма позволяет ослабить влияние коэффициента отражений на точность измерений не менее, чем в 2 раза.

3. Синтезировано устройство вторичной обработки информации на основе время-импульсного метода преобразования и микропроцессорного вычислительного устройства, что позволяет получить выигрыш по быстродействию не менее, чем в 5 раз.

4. С целью повышения точности измерений алгоритмическим путем синтезированы алгоритмы идентификации измерений на основе метода Калмана, позволяющие получить выигрыш в оценке измерений не менее, чем в 2 раза.

5. Разработаны программы, реализующие алгоритмы время-импульсного преобразования и идентификации измерений. В результате моделирования работоспособности программ в системе команд микропроцессора КР580 получена оценка быстродействия, составляющая величину не менее, чем 20 отсчетов в секунду, что подтверждает

возможность проведения измерений в реальном масштабе времени.

6. По результатам теоретических и экспериментальных исследований предложена система измерений скорости звука в жидких средах с повышенными метрологическими характеристиками.

#### СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Дорошков А.В., Полонский А.Д. Анализ возможности повышения быстродействия измерителей скорости звука. Деп. рук. УкрНИИТИ, № 2460 - Ук. 93, 1993. - II с.

2. Дорошков А.В., Полонский А.Д. Микропроцессорная обработка данных в измерителях скорости звука. Деп. рук. УкрНИИТИ, 1994. - 13 с.

3. Дорошков А.В., Полонский А.Д. Повышение быстродействия измерителя скорости звука. Деп. рук. НИИТЭХИМ, № 95 - КП94. - 13 с.

4. Дорошков А.В., Полонский А.Д. Микропроцессорный ультразвуковой анализатор физико-химических свойств веществ и материалов //Материалы НТК "Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах и конверсии производств". - Хмельницкий, 1993. - с. 14.

5. Дорошков А.В., Полонский А.Д. Быстродействующий микропроцессорный измеритель скорости звука в жидких средах //Материалы НТК "Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах и конверсии производств". - Хмельницкий, 1993. - с. 46.

6. Володченко Г.С., Полонский А.Д. Синтез устройств адаптивной коррекции сигнала в измерителе скорости звука. - В кн. Тез. докл. НТК преподавателей, сотрудников и студентов. - Сумы, 1993. с. 157.

7. Дорошков А.В., Полонский А.Д. Влияние способа привязки импульса излучения на точность измерений в измерителе скорости звука. - В кн. Тез. НТК преподавателей, сотрудников и студентов. - Сумы, 1993. - с. 159.

А Н Н О Т А Ц И Я

Полонский А.Д. Синтез системы измерения скорости звука в жидких средах.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 - техника физического эксперимента, физика приборов, автоматизация исследований, Сумский гос. ун-т., Сумы, 1994.

Защищается 7 научных работ, которые содержат теоретические и экспериментальные исследования повышения быстродействия и точности измерений скорости звука в жидких средах. Установлено, что повышение быстродействия и точности измерений достигается за счет совершенствования аппаратной части, применения микропроцессорной обработки информации и алгоритмов идентификации измерений.

Осуществлено внедрение предложенных устройств и алгоритмов по результатам выполнения хозяйственных научно-исследовательских работ.

Ключові слова:

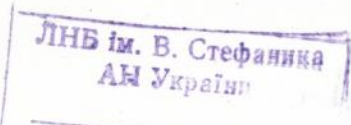
система вимірювань, швидкість звуку в рідинних середовищах, часо-імпульсний метод, алгоритми ідентифікації вимірювань.

S Y N O P S I S

Polonsky A.D. The synthesis of sound measurement in the liquid surroundings.

The dissertation is presented for a Candidate of Technical Science by profession line 01.04.01 - the technic of physical experiment, the physic of devices, the automation of research, Sumy State University, Sumy, 1994.

Seven scientific works are being defenced, which contain theoretical and experimental researches about quick-action and sound



55045

measurement in the liquid surroundings. It is established, that quick-action and precision measurement are achieved by improvement of machine components, microprocessor information processing and algorithm of measuring identification. It is realized the incultation of suggesting devices and algorithmes, according to results of self-supporting research works.



Полонский Александр Дмитриевич

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ  
СКОРОСТИ ЗВУКА В ЖИДКИХ  
СРЕДАХ

Ответственный за выпуск

Соловей Владимир Алексеевич

Топоров Валентин Валентинович

---

Подписано к печати 04. 11. 1994

Формат бумаги 60x90 I/16

Усл. печ.л. 0,75

Тираж 100 экз.

---

СумГУ. 244007, Сумы, ул. Римского-Корсакова, 2

---

Типография ПО "Электрон". 244007, Сумы, ул. Римского-Корсакова, 2

СумГУ  
244007

Ab 31.3.17

455075

AB 31.319

**AB 31.319**

measurement in the liquid surface  
quasi-action and precision of  
of machine components, sensors  
and algorithms of measuring identification. It is realized the  
incorporation of weighting devices and algorithms, according  
to results of self-supporting research work.

Содержание: Измерения температуры

Содержание: Измерения температуры

Содержание: Измерения температуры

Содержание: Измерения температуры

Подписано в печать 04.11.54

Формат 84x110 1/16

Усл. печ. л. 0,78

Тираж 100 экз.

СудГУ. 244007, Судна, ул. Рязанского-Корсакова, 2

Библиографическое описание: Судна, ул. Рязанского-Корсакова, 2

NR 2042