

УДК 629.76.017.1

Д. В. ДУНАЕВ, Л. В. КРИВОБОКОВ*Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное», Украина*

К ВОПРОСУ СОСТАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ПРОГРАММ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В статье предложена методика составления комплексной программы экспериментальной отработки на основании данных по отработке ракетно-космических комплексов, которая отличается от существующих наличием следующих элементов: анализ отработки изделий с применением квалификационных статусов, планирование испытаний на основании видов, категорий испытаний их прототипов, определение необходимого количества объектов испытаний и их уровней. По результатам анализа методики определены мероприятия, уменьшающие стоимость и продолжительность отработки изделий – применение моделей, макетов, принципа «укрупнения» объектов испытаний для сборок, стадий «развития» изделий, а также типового алгоритма отработки и оптимального сочетания двух подходов при организации разрушающих испытаний.

Ключевые слова: ракета космического назначения, комплексная программа экспериментальной отработки, элемент методики, вид и категория испытаний, разрушающие испытания.

Введение

Актуальность проблемы составления оптимального плана экспериментальной отработки (ЭО) с целью уменьшения её стоимости и продолжительности рассматривается в [1, 2] для летательного аппарата, в статье авторов [3] для ракет космического назначения (РКН) и в [4] для двигательных установок ракет. Типовым решением по удовлетворению требований к стоимости и продолжительности является смещение как можно большего количества видов, категорий испытаний в наземную экспериментальную отработку (НЭО), что, в конечном итоге, приводит к уменьшению, в первую очередь, стоимости всей ЭО РКН. Однако продолжительность НЭО значительная и обусловлена широкой номенклатурой изделий, иерархической структурой ракетно-космического комплекса (РКК) и характеризуется последовательным усложнением объектов испытаний. Одновременно с этим продолжительность НЭО неразрывно связана с её стоимостью, что при составлении оптимального плана является первоочередной проблемой.

Целью статьи является детальное рассмотрение обобщенной методики составления комплексной программы экспериментальной отработки (КПЭО) с использованием элементов, которые снижают стоимость и продолжительность НЭО.

Постановка задачи и метод её решения

Снижение стоимости и продолжительности

НЭО является комплексной задачей, решение которой во многом определяется методикой составления КПЭО [2, 5]. В свою очередь общая стоимость НЭО определяется по формуле

$$C = n_{зи} C_{зи} + n_{аи} C_{аи} + n_{ки} C_{ки},$$

где $n_{зи}$, $n_{аи}$ и $n_{ки}$ – количество видов, категорий испытаний в этапах испытаний заводских, автономных и комплексных соответственно;

$C_{зи}$, $C_{аи}$, $C_{ки}$ – стоимость этапов испытаний заводских, автономных и комплексных соответственно.

Продолжительность же НЭО с учетом целесообразного использования материальных и финансовых ресурсов зависит, в основном, от количества необходимых видов, категорий и объектов испытаний.

При этом на этапе заводских испытаний исследуются только параметры самого объекта, на этапе автономных испытаний – параметры объекта испытаний, влияющие на систему, подсистему, агрегат или их составные части, в которую он входит, а на этапе комплексных испытаний – параметры ОИ, влияющие на другие системы, подсистемы, агрегаты или их составные части [1, 2]. Каждый этап заканчивается контрольным испытанием, вид и категория которого определяется КПЭО комплекса [6, 7]. Отработка ОИ заканчивается этапом летных испытаний, который необходим, чтобы убедиться в том, что изделие опытного производства обладает заяв-

ленными параметрами и выполняет требуемые функции.

Далее рассмотрим более детально решение поставленной задачи на примере комплексных программ экспериментальной отработки ракетно-космических комплексов «Циклон-4», «Зенит» для РКН [6, 7] и «Таурус-II» для основной конструкции первой ступени ракеты-носителя (РН) и систем РКК (т.е. пневмогидравлической системы подачи компонентов топлива (ПГСП)) [8].

Существующие методики составления КПЭО в современных условиях часто приводят к неоптимальной НЭО с точки зрения минимизации её стоимости и продолжительности. Поэтому предлагается методика, которая учитывает следующие элементы:

- анализ квалификационных уровней объектов испытаний (ОИ) для конкретного проекта ракетно-космического комплекса;
- определение необходимых этапов, видов и категорий испытаний для каждого из объектов испытаний на основании данных по отработке его прототипа и (или) назначением метода экспертных оценок;
- определение количества необходимых объектов испытаний для каждой категории, вида и этапа испытаний, в том числе уровней сборок и количество стадий «развития» изделий.

Первый элемент методики основывается на том, что объекты испытаний распределяют на четыре квалификационных уровня [9]. Основной целью этого элемента является уменьшение количества ОИ за счет исключения из отработки изделий с квалификационным статусом А, а также уменьшением количества образцов с квалификационным статусом Б и В, что, в основном, уменьшает стоимость НЭО.

Второй элемент методики основан на определении требуемых видов и категорий испытаний с помощью его прототипа и подробно описан в статье авторов [3]. Для определения требуемых видов и категорий испытаний используем метод экспертных оценок с учетом опыта отработки требуемых рабочих характеристик ОИ, а также условий его эксплуатации и нормативных документов (ГОСТы, ОСТы, стандарты предприятия). При отсутствии опыта отработки требуемых рабочих характеристик ОИ составляется ориентировочный перечень видов и категорий испытаний, который может корректироваться по ходу выполнения отработки объекта.

Количество этапов отработки объекта испытаний определяется изделием наивысшего уровня, составной частью которого он является (рис. 1). Объекты испытаний, как правило, подвергаются нескольким этапам отработки (заводские, автономные, комплексные испытания и лётные испытания).

На рис. 1 наименьшим (низшим) уровнем изделия является деталь (комплектующий элемент), ос-

новной признак которой (го) – отсутствие составных частей. Функциональный узел (следующий уровень изделий) содержит два и более изделия низшего уровня, блок – два и более функциональных узлов и далее вплоть до комплекса n -й категории (РКК).

Таким образом, уровень более высокого изделия определяется наивысшим уровнем двух и более составных частей всего рассматриваемого изделия. Однако на практике [10 – 14], начиная с уровня ступеней РН, категория комплекса (РН, РКН и РКК) может определяться более просто – лишь по одной составной части наивысшего уровня всего рассматриваемого изделия. Данное упрощение объясняется тем, что ступени РН имеют различные категории комплексов ввиду их разных иерархических уровней, и его суть заключается в том, что уровень ракеты-носителя (комплекс $(i+1)$ -й категории) определяется наивысшим иерархическим уровнем одной из ступеней (комплекс i -й категории). Например, составные части РКК (РКН и наземный комплекс) тоже имеют разные иерархические уровни и поэтому на рис. 1, для упрощения рассуждений, представлена иерархия изделий без учета иерархии наземного комплекса.

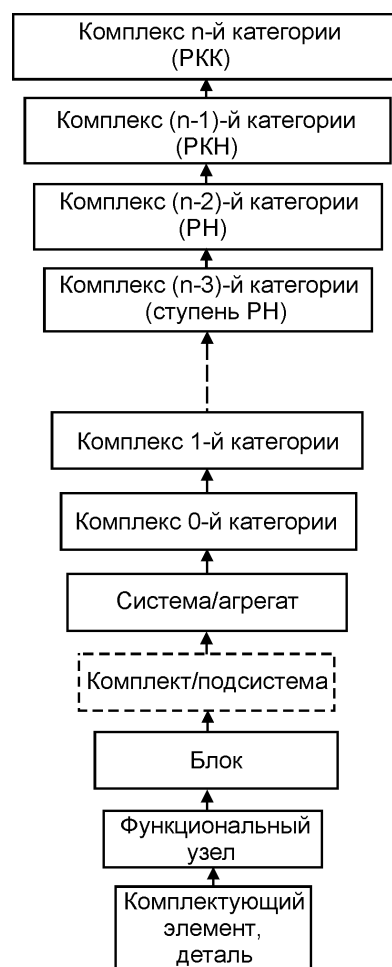


Рис. 1. Уровни изделий при отработке

Кроме того, «переход» к следующему уровню изделия, составной частью которого является объект испытаний, возможен только при условии его полной отработки. Для подсистем, комплектов, систем, агрегатов, комплексов i -й категорий (далее изделия высшего уровня) таких «переходов» может быть несколько, и эта отработка изделий считается этапом заводских испытаний. Для уровней изделий подсистема, комплект, система и агрегат «переход» один – подсистема → система или подсистема → агрегат, что соответствует этапу автономных испытаний. Для уровней изделий комплекс i -й категории «переходов» может быть несколько, что соответствует этапу комплексных испытаний.

Стоит отметить, что последовательность на рис. 1 отражает принцип «укрупнения» ОИ, применение которого способствует снижению, в основном, продолжительности отработки, особенно для изделий высшего уровня.

Сочетание во втором элементе методики принципа «укрупнения» ОИ и определения требуемых видов, категорий испытаний с помощью прототипа уменьшает стоимость и длительность отработки (особенно для изделий высшего уровня).

Третий элемент методики напрямую зависит от опыта составления КПЭО других РКК и опыта разработчика изделия высшего уровня (рис. 1). Поясним третий элемент более подробно.

Последовательность на рис. 1 для рассматриваемого ОИ с учетом опыта может начинаться с любого звена, использоваться не вся последовательность звеньев (например, может отсутствовать звено «комплект» и(или) «подсистема», тогда блок будет входить в систему/агрегат, а звено «комплект» может входить в комплекс i -й категории), а окончанием «укрупнения» ОИ может быть не РКК, а только его ступень (комплекс $(n-3)$ -й категории).

Примером окончания «укрупнения» ОИ является РН «Зенит» [10], где модифицировалась, в основном, космическая головная часть (Зенит-2SLБ) и (или) добавлялись разгонные блоки и третья ступень (Зенит-3SL, Зенит-3SLБ, Зенит-3SLБФ) [10 – 14], а также «Тaurus-II», где отработывалась основная конструкция первой ступени ракеты-носителя (РН) и систем РКК (т.е. ПГСР) [8].

Из анализа КПЭО можно выделить алгоритм отработки изделий любого уровня (рис. 2). Этот алгоритм является типовым для изделий уровня комплектующих элементов (деталей), функциональных узлов, блоков, а для изделий прочих уровней звено моделирования, как правило, отсутствует из-за сложности их моделирования. Применение типового алгоритма, в основном, снижает стоимость отработки ОИ, особенно для изделий высшего уровня.

Одновременно с принципом «укрупнения» ОИ при испытаниях практикуется широкое применение сборок, представленных в таблице 1 для изделий уровня блоков, подсистем, систем, агрегатов, комплексов i -й категорий, а также стадий «развития» изделий согласно [15], представленных в таблице 2. Стоит отметить, что сборкам и стадиям «развития» изделий можно присвоить эквивалентные уровни изделий по двум и более их составным частям наивысшего уровня, а их применение, в основном, удешевляет отработку изделий высшего уровня.

Необходимое количество объектов испытаний для каждой категории, вида и этапа испытаний зависит от следующих основных факторов:

- квалификационного статуса;
- количества рабочих характеристик требующих отработки;
- «жесткости» требований (диапазон возможных изменений) к измеряемым параметрам;
- наличием отработанных или уже готовых методик оценки параметров и проведения анализа.

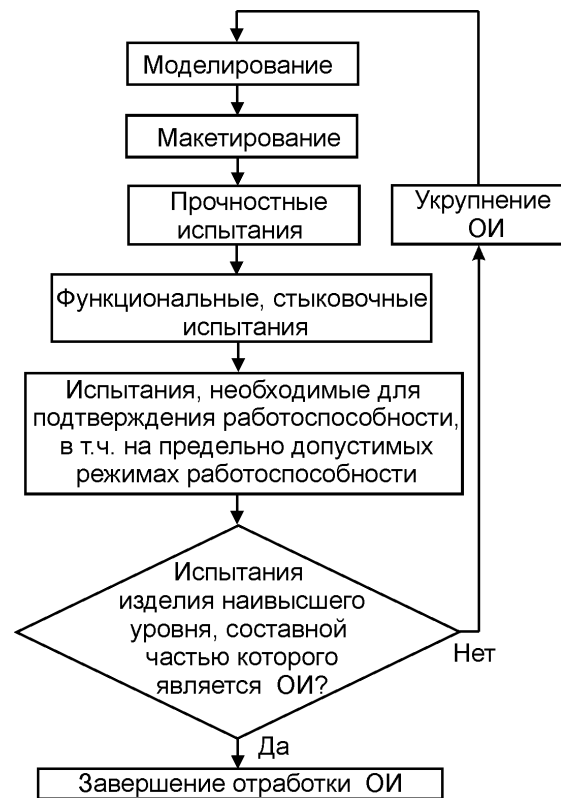


Рис. 2. Пример упрощенного алгоритма отработки ОИ

Эти факторы определяют количество ОИ для всей программы испытаний объекта за счет увеличения уровней сборок и использования различных стадий «развития» изделий с учетом возможности их восстановления. Однако заявленное количество объектов испытаний может быть увеличено из-за необ-

ходимости проведения испытаний (определяется требующими отработки рабочими характеристиками), при которых ОИ разрушается и его восстановление нецелесообразно (далее – разрушающие испытания). При этом следует отметить, что существует два противоречивых подхода в организации проведения разрушающих испытаний: первый заключается в том, что только наиболее важные составные части рассматриваемого изделия подвергаются разрушающим испытаниям, второй – в том, что в целом рассматриваемое изделие подвергается разрушающим испытаниям, например, прочностные и ресурсные. Примером первого подхода являются прочностные испытания баков системы ПГСП с целью получения сил, деформирующих или разрушающих его конструкцию, а примером второго подхода – ресурсные испытания двигателя в целом. При выборе подхода к организации разрушающих испытаний чаще всего используют критерий отношения стоимости составной части изделия к стоимости всего изделия. Основным преимуществом применения первого подхода является «выигрыш» в стоимости проведения разрушающих испытаний с выбранными составными частями

за счёт увеличения количества испытаний и ограничения информативности о состоянии изделия в целом. Преимуществом второго подхода является исчерпывающая информативность о состоянии изделия до и после разрушающих испытаний. Однако применение данного подхода может ограничиваться физическими параметрами изделия (габариты и вес), стоимостью самого изделия и отсутствием стендов, на которых можно было бы проводить испытания в натуральную величину изделия. Поэтому сочетание обоих подходов при организации разрушающих испытаний является основной целью КПЭО изделий, в которых присутствуют данные испытания. Примером оптимального сочетания обоих подходов при организации разрушающих испытаний является ПГСП, где основные элементы клапаны, вентили, баллоны, баки и т. д. подвергаются ресурсным испытаниям, а затем в составе ПГСП – летным испытаниям. Таким образом, обеспечивается уменьшение стоимости экспериментальной отработки ПГСП с минимально допустимыми потерями информации о состоянии изделия во время полета.

Таблица 1

Уровни сборок, применяемых при ЭО ракеты

Наименование	Состав	Область применения
Опытная конструкция (ОК)	Составная часть ступени, которая по конструктивным размерам и (или) функциональным характеристикам имитирует штатную конструкцию	Для испытаний составных частей ступеней, например, функциональных испытаний
Конструкторско-технологический макет (КТМ) или конструкторский макет (КМ)	Ступень или ракета-носитель в целом имитирующая штатную конструкцию по внешнему виду, длинам, местам крепления, конфигурации основных составных частей и т.д.	Для макетирования составных частей ступеней и ракеты-носителя, проведения различных специальных испытаний, например, длительным хранением
Изделие «5000»	Бак с трубопроводами, со стендовой системой управления	Для испытаний пневмогидравлической системы с использованием модельных жидкостей
Изделие «7000»	Двигательная установка со стендовой системой управления и измерения	Для проведения огневых стендовых испытаний ступени
Электро-заправочный макет (ЭЗМ)	Практически штатная ракета без полезной нагрузки в головной части, с имитаторами пиротехнических средств и других электроопасных сборок (электровоспламенитель)	Для совместной отработки РКН и систем заправки (слива), циклограмм пуска, а также для отработки наземного технологического оборудования на технической позиции и стартового комплекса
Изделие «5200»	Ракета в штатном исполнении	Для транспортировочных испытаний
Примечание:		
а) конструкторский макет изготавливается универсальным способом без «штатного оснащения», а КТМ изготавливается по технологическому процессу для опытного образца [7];		
б) КМ и КТМ находятся в одной строке ввиду того, что для уменьшения стоимости отработки КМ, как правило, дорабатывают до КТМ [7]		

Стадии «развития» изделия при его производстве (испытаниях)

Стадия «развития» изделий	Применение
Модель	В современных условиях все чаще используется аналоговая (компьютерная) модель и реже физическая, которая изготавливается в процессе выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ
Макет	Наиболее распространена физическая модель, в которой сохраняются количественные соотношения между элементами изделия и моделируются отдельные его свойства, например, габаритные размеры, вес
Экспериментальный образец	Выполняется в натуральную величину для исследовательских испытаний и представляет собой законченное в функциональном отношении изделие
Опытный образец	Вместо опытного образца может быть изготовлен головной образец продукции, что характерно для мелкосерийного и единичного производства изделий с длительным циклом изготовления и монтажа, при создании особо сложных изделий (комплексов), требующих значительных материальных и финансовых затрат
Штатное изделие (Готовая продукция [15])	Последняя стадия «развития» после опытного или головного образца для продукции (изделий) РКН

Заключение

Представленная в статье методика составления КПЭО позволяет решить комплексную задачу по уменьшению стоимости и длительности отработки РКН за счет следующих мероприятий:

- исключения изделий, которые не требуют отработки (изделия квалификационного уровня А), и уменьшения количества образцов с квалификационным статусом Б и В;
- применения моделей, макетов;
- составления плана отработки изделия (определение требуемых видов и категорий испытаний) по его прототипу;
- применения принципа «укрупнения» ОИ для сборок и стадий «развития» изделий;
- применения типового алгоритма отработки; оптимального сочетания подходов при организации разрушающих испытаний, если таковые требуются.

Литература

1. Экспериментальная отработка космических летательных аппаратов [Текст] / В. А. Афанасьев, В. С. Барсуков, М. Я. Гофрин, Ю. В. Захаров, и др. ; под ред. Н. В. Холодкова. – М. : Изд-во МАИ, 1994. – 418 с.
2. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем [Текст] : учеб. пособие / Л. Н. Александровская, В. И. Круглов, А. Г. Кузнецов, В. А. Кузнецов и др. – М. : Логос, 2003. – 736 с.
3. Дунаев, Д. В. Системный подход к планированию экспериментальной отработки новых и модернизируемых ракет-носителей [Текст] /

Д. В. Дунаев, Л. В. Кривококов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 4(121). – С. 26 – 31.

4. *Space Launch Report: Antares (Taurus II) [Electronic recourse] / Antares (Taurus II)*. – Access mode: <http://www.spacelaunchreport.com/taurus2.html>. – 1.09.2015.

5. *Надежность и эффективность в технике [Текст] : справочник в 10 т. / Ред. совет: В. С. Авдеевский (предс.) [и др.]* – М. : Машиностроение, 1989. – Т. 6: *Экспериментальная отработка и испытания / под общ. ред. Р. С. Судакова, О. И. Тескина*. – 376 с.

6. *Ракета космического назначения 2Ц41. Комплексная программа экспериментальной отработки [Текст]*. – ГП КБЮ, 2005. – 140 с.

7. *К11К77. Комплексная программа экспериментальной отработки универсального космического ракетного комплекса [Текст]*. – ГП КБЮ, 1979. – 62 с.

8. *РКК «Тaurus-II». Комплексная программа экспериментальной отработки основной конструкции первой ступени ракеты-носителя и систем РКК «Тaurus-II» [Текст]*. – ГП КБЮ, 2009. – 93 с.

9. *Дегтярев, А. В. Системный подход к планированию экспериментальной отработки новых и модернизируемых ракет-носителей [Текст] / А. В. Дегтярев, А. Э. Кашианов, Л. В. Кривококов // Системные технологии : региональный межвузовский сборник научных трудов*. – 2011. – № 6(77). – С. 44 – 50.

10. *Зенит 2 (ракета-носитель) [Электронный ресурс] / Википедия*. – Режим доступа: [http://gruzdoff.ru/wiki/Зенит-2_\(ракета-носитель\)](http://gruzdoff.ru/wiki/Зенит-2_(ракета-носитель)). – 1.09.2015.

11. *Пусковые услуги. Ракета-носитель «Зенит-3SL» [Электронный ресурс] / Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры*. – Режим доступа: <http://www.tsenki.com/>

launch_services/help_information/rockets_carriers/view/?SECTION_ID=4&ELEMENT_ID=94. – 1.09.2015.

12. Пусковые услуги. Ракета-носитель «Зенит-3SLБ» (Зенит-2СБ с РБ ДМ-SLB) [Электронный ресурс] / Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры. – Режим доступа: http://www.tsenki.com/launch_services/help_information/rockets_carriers/view/?SECTION_ID=4&ELEMENT_ID=97. – 1.09.2015.

13. Пусковые услуги. Ракета-носитель «Зенит-3SLБФ» (Зенит-2СБ с РБ «Фрегат-СБ») [Электронный ресурс] / Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры. – Режим доступа: http://www.tsenki.com/launch_services/

help_information/rockets_carriers/view/?SECTION_ID=4&ELEMENT_ID=6025. – 1.09.2015.

14. Ракета космического назначения «Зенит-3SL» [Электронный ресурс] / Морской старт. – Режим доступа: <http://sea-launch.narod.ru/lv.htm>. – 1.09.2015.

15. ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения [Текст]. – Взамен ГОСТ 16504-74 ; введ. 01.01.1982. – М. : Стандартинформ, 2011. – 22 с.

Поступила в редакцию 2.09.2015, рассмотрена на редколлегии 14.10.2015

ДО ПИТАННЯ СТВОРЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ПРОГРАМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВІДПРАЦЮВАННЯ РАКЕТ КОСМІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Д. В. Дунаєв, Л. В. Кривобоков

В статті запропоновано методику створення комплексної програми експериментального відпрацювання на основі даних по відпрацюванню ракетно-космічних комплексів, яка відрізняється від існуючої врахуванням наступних елементів: аналіз відпрацювання виробів з використанням кваліфікаційних статусів, планування випробувань на основі видів, категорій випробувань їх прототипів, визначення необхідної кількості об'єктів випробувань та їх рівнів. За результатами аналізу визначено заходи, які зменшують вартість та тривалість відпрацювання виробів – використання моделей, макетів, принципу «укрупнення» об'єктів випробувань для зборок, стадій «розвитку» виробів, а також типового алгоритму відпрацювання та оптимального поєднання двох підходів при організації руйнуючих випробувань.

Ключові слова: ракета космічного призначення, комплексна програма експериментального відпрацювання, елемент методики, види і категорії випробувань, руйнуюче випробування.

REGARDING COMPOSING COMPREHENSIVE DEVELOPMENT TEST PROGRAMS FOR INTEGRATED LAUNCH VEHICLE

D. V. Dunaiev, L. V. Kryvobokov

The article proposes technique of composing comprehensive development test programs on the basis of data on testing of space rocket complexes, which differs from the existing by presence of the following elements: analysis of testing of with application of products statuses of qualification, planning of tests on the basis of types, categories of tests of their prototypes, definition of necessary amount of test objects and their levels. Based on the analysis technique results, measures are established to reduce the cost and duration of product development testing – application of models, mockups and the principle of "consolidation" of test objects for assemblies, stages of "development" of products, as well as a typical algorithm of processing and optimum combination two approaches for organization of destructive testing.

Key words: integrated launch vehicle, comprehensive development test programs, element of technique, test type and category, destructive test.

Дунаєв Дмитрій Владимирович – ведучий інженер відділу якості системного аналізу характеристик якості, ГП «КБ «Южное», Дніпропетровськ, Україна, e-mail: dimor_diit@mail.ru.

Кривобоков Леонід Васильєвич – канд. техн. наук, інженер 1-й кат. відділу системного аналізу характеристик якості, ГП «КБ «Южное», Дніпропетровськ, Україна.