УДК 622.73

Н. С. ПРЯДКО, Е. В. ТЕРНОВАЯ

АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНУТРЕННИХ ПОЛОСТЕЙ ПОМОЛЬНОЙ КАМЕРЫ СТРУЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Для повышения эффективности и снижения энергоемкости тонкого измельчения помимо улучшения технологии процесса необходимо совершенствовать конструкции помольной камеры измельчителей. В работе рассматривается акустическая картина течения энергоносителя в помольной камере струйного измельчителя на основе выявления природы основных источников акустического излучения. Установлены зоны помольной камеры струйной противоточной мельницы, аналогичные областям обтекания турбулентными струями препятствий и выемок. Проведен анализ вихреобразования потока энергоносителя при обтекании различных выемок как на дозвуковых, так и на трансзвуковых скоростях.

Проанализированы акустические сигналы, зафиксированные в двух акустически характерных зонах камеры измельчителя: в центре столкновения струй и в выемке донной области. Установлено, что наиболее мощные пульсации давления наблюдаются при натекании струй на препятствия и при столкновении двух противоточных струй в центре камеры. Проведен анализ пульсаций давления на различных участках выемки. Установлено, что существующие подходы применимы лишь для некоторых участков помольной камеры, так как из-за наличия встречного потока процесс вихреобразования усложняется.

Исследования показали возможность анализа вихревой структуры потоков энергоносителя в помольной камере струйной мельницы на основе акустических сигналов, записываемых в ходе измельчения.

Для підвищення ефективності і зниження енергоємності тонкого подрібнення крім поліпшення технології процесу необхідно удосконалювати конструкції помольної камери подрібнювачів. У роботі розглядається акустична картина течії енергоносія в помольній камері струминного подрібнювача на основі виявлення природи основних джерел акустичного випромінювання. Встановлено зони помольної камери струминного протиточного млина, які аналогічні областям обтікання турбулентними потоками перешкод і виїмок. Проведено аналіз вихроутворення потоку енергоносія при обтіканні різних виїмок як на дозвукових, так і на трансзвукових швидкостях.

Проаналізовано акустичні сигнали, що зафіксовані у двох акустично характерних зонах камери подрібнювача: в центрі зіткнення струменів і у виїмці донної області. Встановлено, що найбільш потужні пульсації тиску спостерігаються при натіканні струменів на перешкоди і при зіткненні двох протиточних струменів у центрі камери. Проведено аналіз пульсацій тиску на різних ділянках виїмки. Встановлено, що існуючі підходи можна застосовувати лише для деяких ділянок помольної камери, тому що через наявність зустрічного потоку процес вихроутворення ускладнюється.

Дослідження показали можливість аналізу вихрової структури потоків енергоносія в помольній камері струминного млина на основі акустичних сигналів, що записуються під час подрібнення.

Except for refining the processing technology, there is a need for improving the design of the grinding mill chamber to enhance the efficiency and to reduce the power consumption for fine grinding. The work deals with an acoustic pattern of the energy carrier flow into the grinding chamber of a jet grinder, based on studying the basic acoustic emission sources. Zones of the grinding chamber of a jet return-flow mill, which are analogous to regions of the turbulent flow over barriers and cavities, are determined. Vorticity of the energy carrier flow around various cavities is analyzed both at subsonic and transonic speeds.

Acoustic signals recorded in two acoustic characteristic zones of the grinding chamber are examined: at the center of jets collision and in the bottom cavity. It is found that the most strong pressure fluctuations are observed at inleakage of jets on barriers and at collision of two return-flow jets at the chamber center. Pressure fluctuations in various areas of the cavity are analyzed. It is established that the existing approaches are applicable only to some areas of the grinding chamber since the vorticity process is complicated by the opposing flow.

Studies provided the possibility of analyzing the vortex structure of energy carrier flows into the grinding chamber of the jet mill, based on the acoustic signals recorded in grinding.

Ключевые слова: *струйная мельница, помольная камера, поток, энергоноситель, акустический сигнал, турбулентные струи, выемка, пульсация давления.*

Введение. Продукты тонкого измельчения широко используются во многих отраслях промышленности. В последнее время проводится большая работа по совершенствованию существующих конструкций измельчительных установок и созданию нового оборудования. Для сухого тонкого и сверхтонкого измельчения в настоящее время широко используется способ высоко-

Техн. механика. – 2015. – № 2.

скоростного измельчения материалов, реализуемый путем придания ускорения измельчаемым частицам при помощи струй сжатого воздуха, пара или газа.

Учитывая высокую энергоемкость тонкого измельчения, совершенствование конструкции мельниц с целью повышения эффективности процесса является актуальной проблемой. Однако существующие теории расчета и конструирования струйных мельниц являются недостаточно полными, что не позволяет эффективно использовать весь спектр их преимуществ из-за конструктивных недоработок. Так, наибольшее внимание в литературе по данной тематике в основном отводится расчёту эжекторных узлов, и уже как дополнение следуют рекомендации по исполнению конструктивных параметров помольной камеры [1], хотя пребывание частиц на участке разгона на порядок меньше времени пребывания частиц в зоне соударений струй, а концентрация твердой фазы в зоне измельчения в десятки раз выше, чем на разгонном участке. Не рассмотрены особенности контуров и формы помольного узла, особенности пристеночных течений и вихрей около внутренних стенок камеры. Авторами ранее проведено сравнение геометрических параметров разных по форме противоточных струйных мельниц [2]. Изучение конструктивных характеристик мельниц разного типоразмера показало подобие характерных относительных размеров при разных формах помольной камеры.

Для исследования процесса струйного измельчения разработана методика акустического мониторинга. Установлены связи акустических параметров и технологических характеристик процесса измельчения в промышленной и лабораторных струйных мельницах [3 – 6]. Показано, что на характер записываемых сигналов влияет помимо технологических параметров (давления, температуры энергоносителя, дисперсности материала) положение волновода в помольной камере [7]. Необходимо рассмотреть влияние особенностей течений в донной и пристеночной зоне на акустические сигналы, записываемые в этих областях.

Постановка задачи. Идея связать вихревые течения газа с акустическими сигналами, которые они создают, не нова. На протяжении нескольких десятилетий предметом исследований является излучение звука вихрями, которые образуются турбулентными струями и взаимодействуют с поверхностью каналов истечения. Установлено [8], что характеристики пульсаций давления на поверхности тесно связаны с характеристиками турбулентности слоя смешения струи. Не меньше внимания уделялось также роли крупномасштабных когерентных структур в формировании слоя смешения и излучении шума турбулентными струями. При этом предполагалось, что такие структуры могут давать основной вклад в излучаемый турбулентными струями шум.

Основными источниками акустического шума струй являются:

- мелкомасштабная и крупномасштабная турбулентность в слое смешения и на основном участке струи;
- скачки уплотнения, образующиеся в струе при нерасчетных режимах истечения;
- пульсации давления в канале перед соплом, через которое подается струя;
- пульсации давления при обтекании струями различных препятствий.

Вклад этих источников в акустический шум зависит как от скорости, так и от режима истечения струи.

Анализ пульсаций давления газового потока в измельчителе, как показывает опыт, может служить базой (наряду с другими средствами, такими как измерение газодинамических параметров потока, гранулометрия и др.) для верификации его газодинамических характеристик и настройки измельчителя на работу в оптимальном режиме. Учитывая это, а также практическое отсутствие работ в этом направлении, можно с уверенностью говорить об актуальности аэроакустических исследований процессов, происходящих в струйной мельнице. Исследования аэроакустики помольных камер в процессе измельчения проводились недостаточно полно, хотя, как показали положительные предварительные результаты, это направление в работах по повышению эффективности процесса измельчения может оказаться плодотворным.

Целью данной работы является выявление аналогий акустических особенностей течений в помольной камере струйного измельчителя и течений газа на стенках с кавернами .

Будем рассматривать помольную камеру струйной мельницы как канал сложной формы, в который поступает струя энергоносителя. Схематично камера лабораторной струйной установки производительностью 20 кг/ч с ее выделенными акустически особыми зонами 1 – 4 показана на рис. 1.

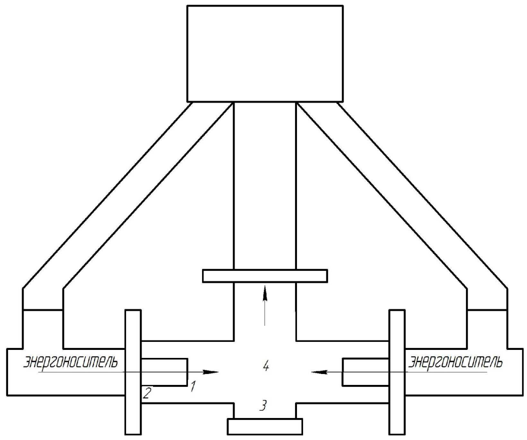

Рис. 1

Локальные препятствия в виде выемок разнообразной формы на обтекаемой поверхности во многих случаях являются источниками акустических излучений. Параметры акустических полей зависят от геометрии неоднородности обтекаемой поверхности, режимов обтекания, характеристик среды и ряда других факторов. Локальные препятствия, помещенные в пограничный слой, образуемый на телах обтекания, воздействуют на вихревые структуры, формирующие этот слой и возбуждающие псевдозвуковые пульсации давления. Кроме того, в выемках образуются вихри, которые вносят свой вклад в шум. Области отрыва и присоединения пограничного слоя, а также удара слоя смешения о стенку выемки являются зонами повышенных пульсационных полей. На данном этапе рассмотрение процессов, происходящих в измельчителе при обтекании выемки дозвуковым потоком, является актуальным.

Одним из главных источников пульсаций давления в турбулентных слоях смешения потоков в камере является свободная турбулентность. Шум дозвуковой струи, истекающей из разгонной трубки, определяется крупномасштабной и мелкомасштабной турбулентностью и имеет непрерывный спектр частот (без дискретных составляющих). Акустический датчик фиксирует такие пульсации и передает непрерывные сигналы на компьютер. Методика записи акустических сигналов в помольной камере описана в [3, 4]. Пример шума дозвуковой струи, истекающей из разгонной трубки в помольную камеру, показан на рис. 2, где представлены запись (а) и спектр (б) сигналов шума дозвуковой струи.

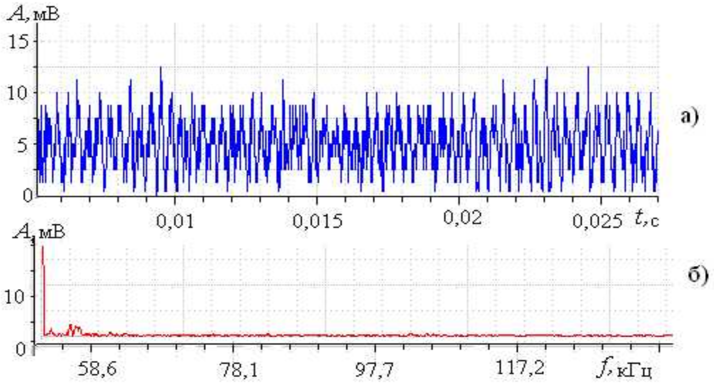

Рис. 2

Образование упорядоченных колебаний на дискретных частотах может происходить в сверхзвуковых струях на нерасчетных режимах (при наличии в них ударных волн). Наиболее мощные пульсации давления возникают при натекании струй (дозвуковых и сверхзвуковых) на препятствия. В этом случае источниками пульсаций (гидродинамического шума) являются турбулентные вихри, которые взаимодействуют с поверхностью. Такой характер пульсаций может наблюдаться в помольной камере при столкновении двух противоточных струй в центре камеры. На рис. 3 показана запись акустических сигналов в центральной зоне помольной камеры при столкновении встречных струй без материала.

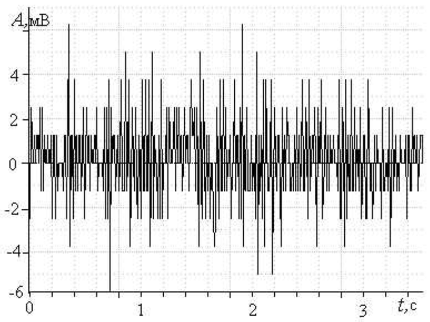

Рис. 3

Существует еще один тип областей, в которых развиваются мощные турбулентные течения. Это донные области в каналах, в которых протекает струя, границы струй, застойные зоны при обтекании уступов, углублений и других плохообтекаемых элементов. Источниками пульсаций давлений тут, как и при натекании струй на препятствие, являются турбулентные вихри слоя смешения, возникающие на элементах поверхности в области отрывных и донных течений. Эти типы пульсаций имеют одну природу и могут наблюдаться в помольной камере. Пульсации давлений таких течений носят случайный характер и имеют непрерывный спектр частот. Однако при некоторых отрывных и донных течениях в спектре пульсаций могут возникнуть и дискретные составляющие. Их появление связано с развитием крупномасштабных когерентных турбулентных структур в общем турбулентном слое смешения и наличием связи между источником колебаний и местом образования крупномасштабных вихрей.

Исследования процессов [8], происходящих при обтекании выемки, показали, что величина пульсаций давления в потоке зависит от относительных геометрических и газодинамических параметров: длины $\bar{l} = l/h_1$, глубины $\bar{h} = h_1/h_2$, радиусов скругления $\overline{r_1} = r_1/h_1$ и $\overline{r_2} = r_2/h_2$, присутствия козырьков у передней и задней стенок $\overline{z_1} = z_1/h_1$, $\overline{z_2} = z_2/h_2$, толщины козырька $\bar{b} = b/h_1$ и углов наклона стенок α_1 и α_2; δ_1/h_1. Здесь δ_1 – толщина пограничного слоя перед выемкой, h_1 и h_2, r_1 и r_2, z_1 и z_2 – глубина, радиус скругления выемки и длина козырька на передней и задней стенке выемки, соответственно. Формы различных выемок представлены на рис. 4. Показаны выемка с углом наклона стенки α_2 (а); выемка с козырьком z_1 (б); выемка со скруглениями стенок (в).

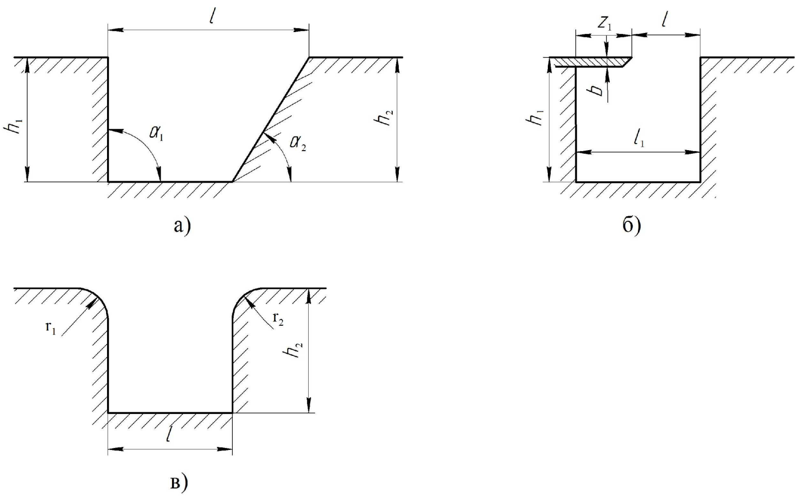

Рис. 4

Эти же геометрические особенности можно найти и в помольной камере (см. рис. 1).

Рассмотрим *сверхзвуковое* турбулентное течение. Возмущения, зарождающиеся около переднего края, перед точкой отрыва в пограничном слое, распространяются над выемкой в направлении ее заднего края. Следовательно, один из источников пульсаций давления расположен на переднем крае выемки, и возмущения, которые он создает, распространяются в сверхзвуковой области течения. Второй источник возмущения расположен на заднем крае выемки. Возмущения, созданные этим источником, распространяются как во внешнем потоке, так и внутри самой выемки. В связи с тем, что слой смешения взаимодействует с задней стенкой, образуется волна давления, которая распространяется внутри выемки и достигает передней стенки. Затем, отразившись от нее, волна движется обратно к задней стенке. Причем скорость распространения образованных волн близка к скорости звука в выемке. Третьим источником возмущений внешнего потока является весь слой смешения, который генерирует волны.

В слое смешения над выемкой образуются вихри крупного масштаба. Они зарождаются у переднего края выемки и смещаются по потоку, быстро увеличиваясь в размере.

Данная картина течения наблюдается в случае коротких и длинных выемок в плоских и осесимметричных течениях. Причем угол наклона задней стенки $\sim_2$ (см. рис. 4 а) не влияет на нестационарную картину течения. За выемкой из слоя смешения формируется пограничный слой, в котором образуется ряд крупных вихрей, идущих друг за другом практически с одинаковым шагом. Скорость распространения крупномасштабных вихрей в пограничном слое за выемкой увеличивается по сравнению с их скоростью в слое смешения.

При *ламинарном режиме* течения в пограничном слое перед точкой отрыва периодически возникает и исчезает область отрывного течения, которая имеет очень малые размеры. Критический перепад давлений в пограничном слое небольшой. В момент, когда приходит волна сжатия к переднему краю выемки, создается перепад давления, который превышает критический. В этом случае происходит микроотрыв пограничного слоя перед выемкой.

Давление в зоне этого отрывного течения определяется акустической волной, поэтому оно сначала достигает максимума, а затем снижается. Аналогично ведет себя зона отрывного течения: вначале увеличивается, а затем сокращается и исчезает. Перед зоной отрыва пограничного слоя образуется скачок уплотнения, перемещающийся вверх по потоку одновременно с увеличением длины отрывного течения, затем он останавливается и перемещается в обратном направлении. После того как исчезнет зона микроотрыва пограничного слоя перед выемкой, он сносится потоком.

Акустические волны при *дозвуковых течениях*, которые излучаются выемкой, распространяются навстречу потоку, и источник акустических возмущений располагается на задней кромке выемки.

Экспериментальные данные [8] показывают, что уровни пульсации давления на задней стенке выше, чем на передней стенке и дне выемки. Максимальные пульсации давления реализуются на задней кромке. Показано, что увеличение относительной длины выемки влечет за собой увеличение уровня пульсаций давления, в то время как увеличение относительной толщины пограничного слоя не оказывает заметного воздействия на пульсации давления. Однако увеличение числа Маха перед выемкой сначала приводит к некоторому возрастанию уровня пульсаций давления, а затем по мере увеличения числа Маха – к небольшому снижению уровня пульсаций давления. Это явление связано с возрастанием, а затем уменьшением уровня дискретной составляющей.

Высокие уровни пульсаций давления на задней стенке определяются взаимодействием турбулентного слоя смешения со стенкой. На передней стенке пульсации давления регулируются двумя процессами: а) распространением шума от места взаимодействия слоя смешения с задней стенкой; б) взаимодействием струи обратных токов, которые возникают в выемке, с передней стенкой. При небольших относительных длинах выемки скорость обратных токов невелика и пульсации давления на передней стенке определяются распространением волн, отраженных от задней стенки. Но при $\bar{l} > 5$ основное влияние на пульсации давления на передней стенке оказывают обратные токи.

На рис. 5 показан характерный спектр пульсаций давления $L_{\Delta f}$ для частот f, измеренных в выемке [8] при разных относительных температурах $\bar{T}$.

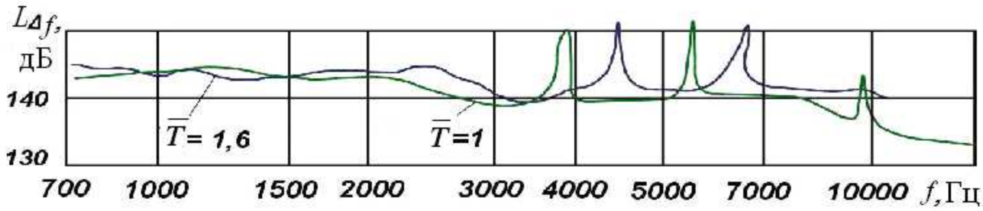

Рис. 5

В зависимости от числа Маха M_1, относительной длины выемки $\bar{l} = \frac{l}{h_1}$, числа *Re* в спектрах пульсаций давления возможно появление дискретных составляющих, которые могут превышать уровень сплошного спектра на 6 – 15 дБ.

Обратимся к конструкции помольной камеры лабораторной струйной установки УСИ-20 производительностью 20 кг/ч [3]. Можно рассматривать нижнюю часть помольной камеры (см. рис. 1, характерная зона 3) относительно основной оси встречных струй, истекающих из разгонных трубок, как выемку закрытого типа с относительными геометрическими размерами: $\bar{l} = \frac{l}{h_1} = 2$, $\bar{h} = \frac{h_1}{h_2} = 1$. Анализировались акустические сигналы, зафиксированные пьезокерамическим датчиком, соединенным с волноводом, который был установлен на высоте 32 мм от дна помольной камеры (при диаметре камеры d = 120 мм). Акустические сигналы на дне помольной камеры при измельчении кварцевого песка, амплитудно-частотные спектры которых представлены на рис. 6, были записаны при параметрах потока энергоносителя: давлении P = 0,6 МПа и температуре $T = 293^0$ К.

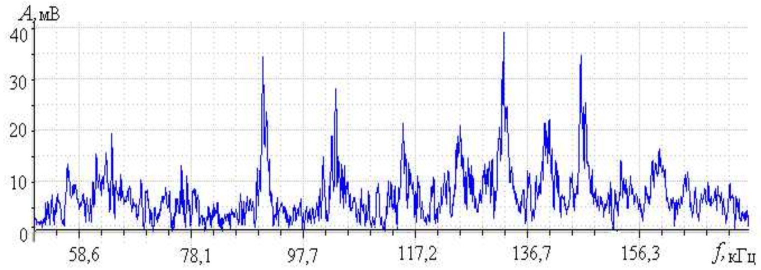

Рис. 6

Сопоставляя спектры пульсаций давления на рис. 5 и спектры акустических сигналов на рис. 6, можно сделать вывод о наличии дискретной составляющей пульсаций в акустических сигналах, в отличие от сигналов, представленных на рис. 2 б. Подобный характер поведения акустических волн дает основание предположить, что волновод фиксирует сигналы, аналогичные тем, которые были порождены пульсациями давления в выемке. Это дает основания для построения акустической картины в помольной камере. Основываясь на результатах [8], можно сказать, что в камере наибольшие пульсации наблюдаются на задней стенке выемки. Однако в помольной камере противоточной струйной мельницы используются встречные потоки, поэтому общая картина пульсаций давления намного усложняется и будет рассмотрена в последующих работах.

Выводы. Установлена аналогия акустических характеристик течений в помольной камере струйного измельчителя и в выемках на обтекаемой стенке. Исследования показали перспективность анализа вихревой структуры потоков энергоносителя в помольной камере струйной установки на основе фиксируемых там акустических сигналов. Необходимо продолжить анализ взаимосвязей явлений пульсаций давления и характера акустических сигналов в помольной камере струйных мельниц и их влияния на процессы измельчения.

1. *Акунов В. И.* Струйные мельницы / *В. И. Акунов.* – М. : Машиностроение, 1967. – 263 с.
2. *Прядко Н. С.* Аэроакустика помольных камер различного типоразмера / *Н. С. Прядко., Е. В. Терновая* // Збагачення корисних копалин. – 2013. – №55 (96). – С. 27 – 33.
3. *Прядко Н. С.* Акустические исследования струйного измельчения / *Н. С. Прядко.* – Saarbrucken Germany : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. –172 с.
4.*Прядко Н. С.* Акустико-эмиссионный мониторинг процесса струйного измельчения / *Н. С. Прядко* // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2012. – № 6. – С. 46 – 52.
5. *Горобец Л. Ж.* Акустический метод исследования процесса измельчения / *Л. Ж. Горобец, В. Н. Бовенко, Н. С. Прядко* // Обогащение руд. – 2013. – № 3. – С. 18 – 24.
6. *Pryadko N. S.* Optimization of fine grinding on the acoustic monitoring basis / *N. S. Pryadko* // Power Engineering, Control & Information Technologies in Geotechnical Systems. – London : Taylor & Francis Group, 2015 P. 99 – 108.
7. Промышленная проверка системы оптимизации струйного измельчения цирконового концентрата / *Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко, В. П. Краснопер, В. Н. Бовенко, Л. А. Цыбулько* // Збагачення корисних копалин. – 2012. – №52 (93). – С. 40 – 45.
8. *Антонов А. Н.* Пульсации давления при струйных и отрывных течениях / *А. Н. Антонов, В. М. Купцов, В. В. Комаров.* – М. : Машиностроение, 1990. – 272 с.

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и
Государственного космического агентства Украины,
Днепропетровск

Получено 16.03.15,
в окончательном варианте 18.05.15