

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 66.074.2

В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, А. Р. Галимова
Г. Х. Гумерова

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УЛАВЛИВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ КАПЕЛЬ ФОРМАЛЬДЕГИДА В СЕПАРАЦИОННОМ УСТРОЙСТВЕ С ДВУТАВРОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Ключевые слова: аэрозоль, мелкодисперсные капли, фракционная эффективность, сепаратор.

Технологические процессы часто сопровождаются выделением в атмосферный воздух загрязняющих веществ. В работе рассмотрена проблема улавливания мелкодисперсных капель формальдегида из газовых потоков на предприятиях химической промышленности. Авторами статьи разработано сепарационное устройство с двутавровыми элементами. Отличительными особенностями устройства являются простота конструкции и возможность быстрой замены его конструктивных элементов или всего устройства сразу. В общем виде сепарационное устройство представляет собой несколько рядов двутавровых элементов, которые заключены в корпус произвольной формы, что позволяет интегрировать его в воздуховод любой формы. Наиболее простой и предпочтительной формой корпуса сепарационного устройства является прямоугольная, так как все двутавровые элементы являются идентичными друг другу и процесс их вставки в конструкцию значительно упрощается. Улавливание мелкодисперсных капель формальдегида внутри сепарационного устройства обеспечивается преимущественно за счет возникновения множества точек вихреобразования, центробежные силы в которых имеют высокие значения, и непосредственного контакта капель жидкости с поверхностями двутавровых элементов. Численное моделирование процесса улавливания мелкодисперсных капель формальдегида в сепарационном устройстве осуществлялось в программном комплексе ANSYS Fluent. ходе моделирования использовалась k-ε модель. Расчетная сетка состояла из 1358046 количества ячеек. В качестве граничных условий задавались скорость газового потока на входе в устройство и атмосферное давление на выходе из него. В ходе работы было установлено, что применение сепарационного устройства с двутавровыми элементами позволяет производить улавливание мелкодисперсных капель формальдегида диаметром 1–10 мкм при скорости движения газового потока в диапазоне от 4 до 15 м/с с эффективностью не менее 80%. При этом результаты показали, что на эффективность улавливания мелкодисперсных капель формальдегида в сепарационном устройстве существенный вклад вносят центробежные силы, значения которых увеличиваются по мере роста входной скорости газового потока и диаметра капель.

V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, A. R. Galimova,
G. Kh. Gumerova

NUMERICAL SIMULATION OF THE PROCESS OF CAPTURING FINE FORMALDEHYDE DROPLETS IN A SEPARATION DEVICE WITH I-BEAM ELEMENTS

Keywords: aerosol, fine droplets, fractional efficiency, separator.

Technological processes are often accompanied by the release of pollutants into the air. The paper deals with the problem of capturing fine formaldehyde droplets from gas streams in the chemical industry. The authors of the article developed a separation device with I-beam elements. The distinctive features of the device are the simplicity of its design and the ability to quickly replace its structural elements or the entire device at once. In general, the separation device consists of several rows of I-beam elements that are enclosed in a case of any shape, which allows you to integrate it into the air duct of any shape. The most simple and preferred form of the separation device body is rectangular, since all I-beam elements are identical to each other and the process of inserting them into the structure is greatly simplified. The capture of fine formaldehyde droplets inside the separation device is provided mainly due to the occurrence of many points of vortex formation, the centrifugal forces in which have high values, and the direct contact of liquid droplets with the surfaces of two-cylinder elements. Numerical simulation of the process of capturing fine formaldehyde droplets in a separation device was carried out in the ANSYS Fluent software package. during the simulation, the k-ε model was used. The calculated grid consisted of 1358046 number of cells. The boundary conditions are a specified velocity of the gas flow at the inlet of the device and the atmospheric pressure at the exit. In the course of the work, it was found that the use of a separation device with I-beam elements makes it possible to capture fine formaldehyde droplets with a diameter of 1-10 microns at a gas flow velocity in the range from 4 to 15 m/s with an efficiency of at least 80%. The results showed that the efficiency of capturing fine formaldehyde droplets in the separation device is significantly affected by centrifugal forces, the values of which increase with the growth of the input gas flow velocity and the diameter of the droplets.

При производстве формальдегида в связи с несовершенством аппаратов абсорбции на многих предприятиях химической промышленности происходит брызгоунос капель формальдегида. Следует отметить, что формальдегид является ценным исходным

сырьем на пути получения различных органических соединений и полимерных материалов с самым разнообразным комплексом свойств. Данный химический элемент с каждым годом имеет тенденцию роста области его применения в сельском хозяйстве,

медицине, деревообрабатывающей, бумажной, текстильной и других промышленности [1].

Образование формальдегида происходит при прохождении метанола-воздушной смеси через слой серебряного катализатора при температуре в зоне контактирования 550-700°C. В целом, процесс получения формальдегида сопровождается выделением тепла, за счет которого поддерживается необходимая температура в зоне контактирования. Процесс абсорбции формальдегида представляют собой процесс массопередачи с быстрой химической реакцией в жидкости. Поэтому впоследствии, газовый поток с оставшимся после стадии абсорбции формальдегидом отправляется на факельное сжигание. Порядка 2–3% формальдегида теряется на факельном сжигании. При производительности порядка 180 тысяч тонн формальдегида в год, потери будут составлять примерно около 3600 т формальдегида в год. Утилизация оставшегося формальдегида приводит к ежегодным валовым экономическим убыткам. Таким образом, факельное сжигание приводит к значительному экономическому ущербу. Следует отметить, что по токсичности формальдегид относится ко 2 классу опасности, являясь высокоопасным веществом, и может представлять вред для работников. Значение ПДК смеси формальдегида в воздухе оказывает токсичное влияние на живой организм человека, которое пагубно воздействует на нервную систему, дыхательные пути, печень, почки, зрение. Хроническое отравление у работающих на предприятиях с техническим формалином проявляется похудением, диспепсическими симптомами, расстройством потоотделения, также возможны случаи бронхиальной астмы. Долговременное испарение небольшого количества формальдегида на предприятиях приводит к незаметному затяжному загрязнению атмосферы. Поэтому попадание формальдегида в окружающую среду является опасным фактором, который необходимо учитывать при транспортировке газового потока, содержащего формальдегид, на факельное сжигание.

Одним из решений уменьшения экономических потерь, вызванных брызгоуносом капель жидкости формальдегида является его улавливание из газового потока. Наиболее распространенными являются эффективные брызготуманолоушки, фильтрующие элементы сухие адсорбционные установки, так и мокрые газопромыватели – скрубберы и абсорберы и другое. Однако данные устройства имеют свой ряд недостатков в использовании на химических предприятиях. Существенным недостатком любых адсорбционных фильтров является их ограниченная емкость. Также не стоит забывать про регулярную замену адсорбента, в противном случае они становятся источником токсичных органических веществ и болезнетворных бактерий, загрязняющих окружающую среду. Мокрые газопромыватели, используемые для влажной очистки газа от дыма, химии, аэрозолей и пыли, имеют следующей недостаток – абразивный износ стенок, возникающий вследствие высоких скоростей газа. Также следует отметить, что наиболее сложно улавливать из газовых потоков мелкодисперсные капли формальдегида, размер ко-

торых составляет менее 10 мкм. Поэтому задача разработки новых конструкций аппаратов или модернизация существующих, направленная на повышение эффективности улавливания мелкодисперсных капель формальдегида на предприятиях химической промышленности является актуальной.

Для решения данной проблемы авторами работы было разработано сепарационное устройство с двутавровыми элементами, позволяющее эффективно улавливать мелкодисперсные капли формальдегида из газовых потоков [2]. Отличительными особенностями устройства являются простота конструкции и возможность быстрой замены конструктивных элементов или всего устройства сразу [3]. В общем виде сепарационное устройство представляет собой упорядоченные ряды двутавровых элементов, заключенные в корпус произвольной формы, что позволяет интегрировать его в воздуховод любой формы. Наиболее простой и предпочтительной формой корпуса сепарационного устройства является прямоугольная, так как все двутавровые элементы являются идентичными друг другу и процесс их вставки в конструкцию и их замены при ее поломке или чистке упрощается (рис. 1). Для обеспечения прочности конструкции и устойчивости двутавровых элементов внутри нее они крепятся по высоте устройства [4-7].

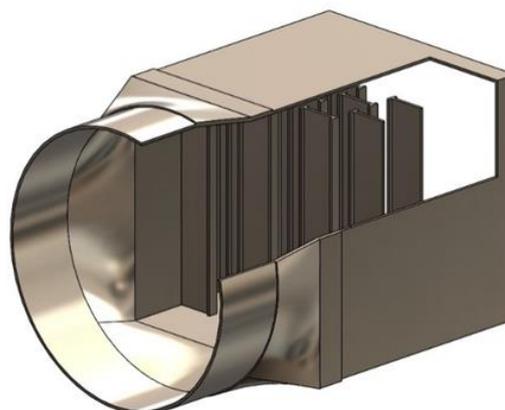


Рис. 1 – Трехмерная модель сепарационного устройства с двутавровыми элементами, подсоединенного к участку воздуховода (вид с разрезом)

Улавливание мелкодисперсных капель формальдегида внутри сепарационного устройства обеспечивается преимущественно за счет возникновения множества областей вихреобразования, центробежные силы в которых имеют высокие значения, и непосредственного контакта капель жидкости с поверхностями двутавровых элементов [8-10]. Движение аэрозоля во внутрь сепарационного устройства с двутавровыми элементами представлено на рис. 2. При обтекании газовым потоком ряды двутавровых элементов возникают центробежные силы, которые действуют на газ, что позволяет закручивать поток. Вследствие малого расстояния между соседними рядами элементов достигаются центробежные силы больших значений, в отличие, например, от циклонов, в которых мелкодисперсные частицы улавливаются с низкой эффективностью, обусловленной от-

носителем небольшими значениями центробежных сил. Множество точек возникновения центробежных сил между рядами двутавровых элементов в сепарационном устройстве можно сравнить с работой батарейных циклонов, которые компоуются несколькими циклонами малого диаметра для увеличения значений центробежных сил и, соответственно, эффективности улавливания мелкодисперсных частиц. Таким образом, при сильном закручивании газового потока мелкодисперсные частицы вылетают из его структуры и попадают на поверхности стенок двутавровых элементов. После чего они стекают по ним в емкость для накопления жидкого формальдегида. Следует отметить, что на рисунках 1 и 2 конструкция сепарационного устройства с двутавровыми элементами представлена без емкости. Данное упрощение выполнено для простоты численного моделирования, описание которого представлено ниже в данной работе.

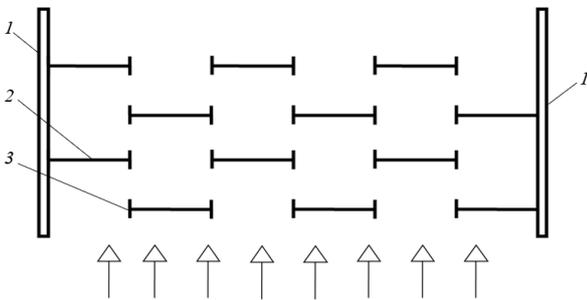


Рис. 2 – Упрощенная двумерная схема сепарационного устройства с двутавровыми элементами (вид сверху): 1 – корпус устройства; 2 – двутавровый элемент; 3 – выступ двутаврового элемента. Стрелки отображают движение газового потока с диспергированными в нем каплями формальдегида

Целью данной работы является численное моделирование процесса улавливания мелкодисперсных капель формальдегида в сепарационном устройстве с двутавровыми элементами. Исследование данного процесса проведено в программном комплексе ANSYS Fluent. Для этого была построена трехмерная модель сепарационного устройства с двутавровыми элементами, представленная на рис. 1, в программном комплексе Autodesk Inventor, откуда впоследствии была экспортирована в ANSYS Fluent. В ходе моделирования использовалась к-ε модель. Расчетная сетка состояла из 1358046 количества ячеек. В качестве граничных условий задавалась входная скорость газа и атмосферное давление на выходе из сепаратора. При этом, были сделаны следующие допущения – концентрация заданного аэрозоля исключает взаимодействие между мелкодисперсными каплями и их влияние на движение несущей среды не учитывается.

Геометрические размеры исследуемой трехмерной модели: диаметр входного патрубка круглого сечения – 95 мм, общая длина трехмерной модели – 140 мм, длина, ширина и высота сепарационного устройства – 80, 85 и 86 мм соответственно, толщина стенок 1 мм, длина двутавровых элементов 14 мм,

длина их выступов 3,5 мм. В каждом ряду располагается по 3 двутавровых элемента, всего рядов – 4.

Для проведения численного моделирования одна часть параметров варьировалась в определенных диапазонах, а другая часть задавалась постоянными значениями. Скорость газового потока W варьировалась от 4 до 15 м/с, диаметр мелкодисперсных капель a изменялся от 1 до 10 мкм, атмосферное давление на выходе из устройства принималось 101325 Па, плотность газового потока ρ принималась равной 1,2 кг/м³, количество мелкодисперсных капель n задавалось равным 1000, плотность мелкодисперсных капель формальдегида задавалась равной 1000 кг/м³. Следует отметить, что реальная плотность формальдегида при нормальных условиях составляет 815,3 кг/м³, однако в ходе технологических процессов теплофизические параметры формальдегида существенно изменяются. Также в ходе ранее проведенных исследований было установлено, что изменение плотности в диапазоне ± 150 кг/м³ мелкодисперсных частиц пыли и капель практически не влияет на эффективность их улавливания в сепарационном устройстве. Поэтому выбор значения плотности формальдегида равной 1000 кг/м³ не повлияет на изменение эффективности сепарационного устройства более, чем на погрешность численного расчета. Также данный выбор позволит в дальнейшем произвести сравнение численного и физического экспериментов при условии, что диспергированной средой в газовом потоке будет вода с плотностью 1000 кг/м³.

Фракционная эффективность сепарационного устройства с двутавровыми элементами E оценивалась по формуле [11, 12]:

$$E = 1 - \frac{n_k}{n}, \quad (1)$$

где n_k – количество мелкодисперсных капель формальдегида, которые остались в газовом потоке после его прохождения в сепарационном устройстве.

Коэффициент гидравлического сопротивления сепарационного устройства с двутавровыми элементами ξ рассчитывался по формуле:

$$\xi = \frac{2\Delta P}{\rho W^2}, \quad (2)$$

где ΔP – потери давления в сепарационном устройстве с двутавровыми элементами, Па.

Результаты проделанных исследований представлены на графиках (рис. 3, 4). Увеличение эффективности улавливания мелкодисперсных капель формальдегида сепарационным устройством с двутавровыми элементами осуществляется за счет роста их диаметра и входной скорости газового потока. Следует отметить, что чем больше диаметр капель формальдегида и выше скорость газового потока, тем большее значение имеет центробежная сила в устройстве. Таким образом, для улавливания мелкодисперсных капель формальдегида необходимо обеспечивать относительно высокие скорости газового потока. С другой стороны, рост входной скорости приводит к существенному увеличению потери давления в устройстве.

Фракционная эффективность улавливания мелкодисперсных капель формальдегида размером 1–10 мкм сепарационным устройством с двутавровыми элементами в среднем равна 86,7% при скорости газового потока от 4 до 15 м/с. При этом фракционная эффективность устройства в среднем равна 80,3, 86,2, 88,7 и 91,6% при скорости газового потока 4, 7, 10 и 15 м/с соответственно. Следует отметить, что центробежные силы в сепарационном устройстве практически не влияют на эффективность улавливания мелкодисперсных капель формальдегида размером 1 мкм при скорости газа от 4 до 15 м/с. Данное утверждение наглядно демонстрируется при сравнении фракционной эффективности улавливания мелкодисперсных капель 1 мкм при различных скоростях. Фракционная эффективность сепарационного устройства составляет 35,7, 37,4, 37,1 и 40,1% при улавливании мелкодисперсных капель формальдегида размером 1 мкм при скорости газового потока 4, 7, 10 и 15 м/с соответственно. При рассмотрении значений фракционной эффективности улавливания мелкодисперсных капель формальдегида, например, размером 4 мкм наблюдается существенный рост эффективности с увеличением скорости газового потока, что указывает на увеличение значений центробежных сил в устройстве. Так, при скорости газового потока 4, 7, 10 и 15 м/с фракционная эффективность улавливания мелкодисперсных капель размером 4 мкм составляет 78,6, 98,3, 99,9 и 99,9% соответственно (рис. 3).

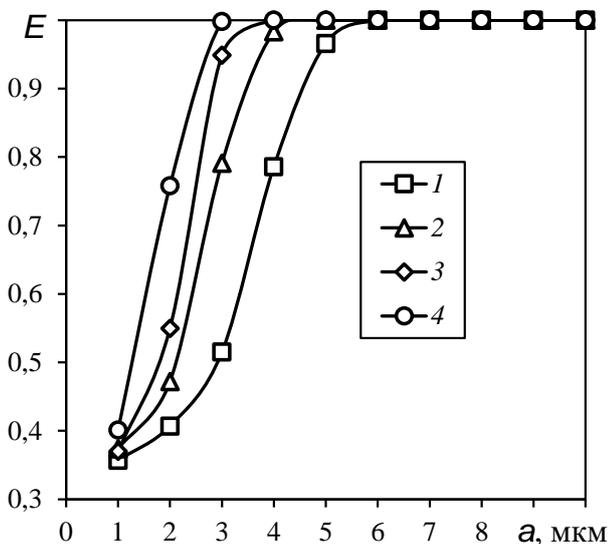


Рис. 3 – Фракционная эффективность улавливания мелкодисперсных капель формальдегида от их диаметра при скорости газового потока, м/с: 1 – 4; 2 – 7; 3 – 10; 4 – 15

Различный вклад центробежной силы на улавливание мелкодисперсных капель формальдегида в сепарационном устройстве отчетливо демонстрируется на рис. 4. Видно, что при улавливании капель диаметром 1 мкм фракционная эффективность от скорости газа имеет зависимость, схожую с линейной, а при улавливании капель диаметром 2 мкм аналогичная зависимость имеет вид, схожую с логарифмической. В ходе исследований также была получена за-

висимость коэффициента гидравлического сопротивления ξ сепарационного устройства с двутавровыми элементами от скорости газового потока W (рис. 4).

$$\xi = 1,5W + 79,1. \quad (3)$$

В среднем коэффициент гидравлического сопротивления сепарационного устройства при скорости газового потока от 4 до 15 м/с равен 90,58. При этом потери давления в устройстве изменялись от 0,8 до 10 кПа.

Таким образом, проведенные численные исследования показали, что применение сепарационного устройства с двутавровыми элементами для улавливания мелкодисперсных капель формальдегида на предприятиях химической промышленности будет иметь положительное влияние как с экономической точки зрения, так и с экологической.

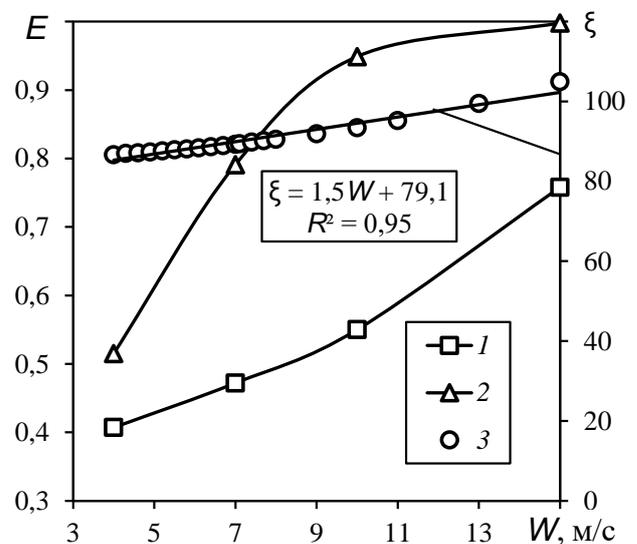


Рис. 4 – Фракционная эффективность улавливания мелкодисперсных капель формальдегида и коэффициент гидравлического сопротивления сепарационного устройства от входной скорости газового потока: 1 – $a = 2$ мкм; 2 – $a = 3$ мкм; 3 – числовые значения коэффициента гидравлического сопротивления

В ходе работы было установлено, что применение сепарационного устройства с двутавровыми элементами позволяет производить улавливание мелкодисперсных капель формальдегида диаметром 1–10 мкм при скорости газового потока W в диапазоне 4–15 м/с с эффективностью не менее 80%. При этом результаты показали, что на эффективность улавливания мелкодисперсных капель формальдегида в сепарационном устройстве существенный вклад вносят центробежные силы, значения которых увеличиваются по мере роста входной скорости газового потока и диаметра капель. Также в работе было отмечено, что по мере уменьшения размера капель формальдегида для их улавливания необходимо создавать центробежные силы больших значений. Для повышения эффективности улавливания мелкодисперсных капель формальдегида рекомендуется увеличивать количество рядов двутавровых элементов в сепарационном устройстве и увеличивать входные скорости

газового потока. Однако, необходимо учитывать технологические возможности предприятий, так как существенно возрастают потери давления в устройстве. Достоинствами сепарационного устройства с двутавровыми элементами являются простота использования, ремонтпригодность, малая металлоемкость и высокая эффективность улавливания мелкодисперсных капель.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-616.2020.8.

Литература

1. Т.А. Сайфутдинов, Р.А. Мамадиев, К.А. Павлова, Д.Р. Исхакова, *Вестник технологического университета*, **18**, 24, 45-46 (2015).
2. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, Ю.О. Семенова, *Вестник технологического университета*, **21**, 12, 109-112 (2018).
3. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, В.Л. Нгуен, *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*, **22**, 1, 3-9 (2020).
4. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, В.В. Харьков, *Вестник технологического университета*, **23**, 3, 85-88 (2020).
5. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, А.И. Поляков, *Вестник технологического университета*, **21**, 11, 66-69 (2018).
6. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, В.Л. Нгуен, *Вестник КГЭУ*, **10**, 1(37), 74-81 (2018).
7. Г.Р. Мингалеева, Ю.Н. Зацаринная, Е.К. Вачагина, *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*, 1-2, 22-31 (2005).
8. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, Н.В. Линь, *Вестник Иркутского государственного технического университета*, **22**, 3(134), 138-144 (2018).
9. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, А.А. Галиев, *Вестник технологического университета*, **21**, 9, 58-61 (2018).
10. A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, O.S. Dmitrieva O.S., *E3S Web of Conferences*, 00007 (2019).
11. V.E. Zinurov, O.S. Popkova, V.L. Nguyen, *E3S Web of Conferences*, 00043 (2019).
12. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, Р.Р. Мубаракшина, *Ползуновский вестник*, 2, 18-22 (2020).

© **В. Э. Зинуров** – аспирант ФГБОУ ВО «КГЭУ», vadd_93@mail.ru; **А. В. Дмитриев** – д.т.н., зав. кафедрой ТОТ ФГБОУ ВО «КГЭУ», ieremiada@gmail.com; **А. Р. Галимова** – студент ФГБОУ ВО «КГЭУ», galimovaar00@mail.ru; **Г. Х. Гумерова** – к.т.н., доцент, доцент кафедры ОПП ФГБОУ ВО «КНИТУ», ggx70@yandex.ru.

© **V. E. Zinurov** – postgraduate student, Kazan State Power Engineering University (KSPEU), vadd_93@mail.ru; **A. V. Dmitriev** – Doctor of Engineering, Head of Department «Theoretical Basis of Thermotechnics», KSPEU, ieremiada@gmail.com; **A. R. Galimova** – student, KSPEU, galimovaar00@mail.ru; **G. Kh. Gumerova** – candidate of technical sciences, associate professor, assistant professor of FPE Dep., KSTU, ggx70@yandex.ru.