

УДК 532.542

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХФАЗНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ ПОГРУЖЕННОГО ДЫРЧАТОГО ЛИСТА

<sup>1</sup>Емельянов Д.А., <sup>2</sup>Мелихов В.И., <sup>1</sup>Мелихов О.И., <sup>1</sup>Никонов С.М.

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, e-mail: NikonovSM@mpei.ru;

<sup>2</sup>ОАО «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности АЭС», Электрогорск, e-mail: vladimir.melikhov@erec.ru

В настоящей статье представлены результаты экспериментального исследования двухфазной гидродинамики погруженного дырчатого листа (ПДЛ). Дано описание стенда ПГВ, на котором было выполнено исследование, описана система измерений и методика проведения экспериментов. Представлены полученные распределения перепадов давления на ПДЛ при различных расходах равномерно подаваемого пара для ПДЛ с равномерной перфорацией, живое сечение равно 5,7%. Показано, что при малых расходах подаваемого пара (низкое объемное паросодержание под ПДЛ) коэффициент гидравлического сопротивления, отнесенный к скоростному напору пара, больше коэффициента гидравлического сопротивления потока чистого пара с тем же расходом. В то же время при больших расходах подаваемого пара (высокое объемное паросодержание под ПДЛ) имеет место обратная ситуация: коэффициент гидравлического сопротивления, отнесенный к скоростному напору пара, меньше коэффициента гидравлического сопротивления потока чистого пара с тем же расходом.

**Ключевые слова:** погруженный дырчатый лист, двухфазное течение, гидравлическое сопротивление, объемное паросодержание

## RESEARCH OF TWO-PHASE HYDRODYNAMICS OF SUBMERGED PERFORATED SHEET

<sup>1</sup>Emelyanov D.A., <sup>2</sup>Melikhov V.I., <sup>1</sup>Melikhov O.I., <sup>1</sup>Nikonov S.M.

<sup>1</sup>National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, e-mail: NikonovSM@mpei.ru;

<sup>2</sup>JSC «Electrogorsk Research and Engineering Center on Nuclear Power Plants Safety», Electrogorsk, e-mail: vladimir.melikhov@erec.ru

Results of experimental research of two-phase hydrodynamics of submerged perforated sheet are reported in current article. Description of PGV test facility is presented as well as measuring system and experimentation method. Received pressure drop distributions along submerged perforated sheet under conditions of different flow rates of uniformly fed steam for sheet with uniform perforation (flow section 5,7%) are reported. It is presented, that in conditions of low flow rates of fed steam (low void fraction below the submerged sheet) hydraulic friction factor, calculated using steam flow rate, is more than hydraulic friction factor of pure steam flow when the total flow rate is the same. At the same time, in conditions of high flow rates of fed steam (high void fraction below the submerged sheet) the situation is opposite: hydraulic friction factor, calculated using steam flow rate, is less than hydraulic friction factor of pure steam flow when the total flow rate is the same.

**Keywords:** submerged perforated sheet, two-phase flow, hydraulic friction, void fraction

Погруженный дырчатый лист используется для выравнивания паровой нагрузки на зеркале испарения [1–3]. Поступающий под ПДЛ пар, встречая сопротивление листа, растекается под ним и под гидростатическим напором воды за краем листа входит в отверстия ПДЛ. Над ПДЛ пузырьки пара барботируют под уровнем воды, образуя динамический двухфазный слой, и выходят в паровое пространство.

Эффективность выравнивающего действия ПДЛ зависит от ряда факторов, среди которых важное место занимает его гидравлическое сопротивление. Следует отметить, что двухфазная гидродинамика, реализующаяся в окрестности ПДЛ, существенно отличается от напорного течения однофазного потока через это устройство, откуда

следует, что и гидравлическое сопротивление ПДЛ в условиях его функционирования в парогенераторе будет иное, чем для однофазного потока.

При малых объемных паросодержаниях под ПДЛ двухфазная смесь достаточно гомогенизирована. Её течение через ПДЛ можно рассматривать как течение гомогенной среды с плотностью большей плотности пара. Поэтому гидросопротивление ПДЛ в этом случае будет превышать гидросопротивление, которое оказывает ПДЛ однофазному потоку пара с тем же расходом. С увеличением объемного паросодержания под ПДЛ двухфазная среда вблизи ПДЛ имеет дисперсный вид, при котором пар является непрерывной фазой, а вода существует в виде капель. При течении дисперсной среды

в отверстиях ПДЛ часть капель осаждается на стенках канала (отверстия), что приводит к формированию жидкой пленки [4]. Наличие жидкой пленки на входе и выходе отверстий ПДЛ сглаживает острые кромки отверстий, вследствие чего уменьшается потеря давления на отверстиях. Наличие капель в потоке пара через отверстия ПДЛ, с одной стороны, увеличивает инерцию потока, что приводит к увеличению гидравлических потерь, а с другой стороны, демпфирует турбулентные пульсации, что наоборот снижает эти потери.

При выходе из отверстий ПДЛ течение пара приобретает безнапорный характер – под действием архимедовой силы он барботирует под уровнем воды и выходит в паровое пространство. Только в небольшой области вблизи ПДЛ (высотой 20–50 мм [5]) течение пара при выходе из отверстия ПДЛ реализуется в виде струи, которая затем трансформируется в пузырьковое течение в барботажном слое. Поэтому после выхода потока за ПДЛ диссипация его энергии в вихрях осуществляется только в этой небольшой (по сравнению с однофазным случаем) области и поэтому невелика относительно соответствующих потерь для однофазного потока.

Из приведенного выше качественно анализа двухфазной гидродинамики в окрестности ПДЛ следует, что определе-

ние гидравлического сопротивления ПДЛ является достаточно сложной задачей, а использование каких-либо упрощающих подходов может привести к неверным результатам. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований двухфазной гидродинамики на стенде ПГВ и, в частности, зависимость гидравлического сопротивления ПДЛ от объемного паросодержания под листом.

**Цель работы:** выполнение экспериментальных исследований двухфазной гидродинамики на стенде ПГВ для определения гидравлического сопротивления ПДЛ при различных режимах его работы.

**Материал и методы исследования**

Стенд ПГВ был разработан для исследования процессов гидродинамики и сепарации пара в горизонтальном парогенераторе [6]. Стенд состоит из сосуда высокого давления (СВД), в котором установлена экспериментальная модель (поперечная «вырезка» натурального парогенератора ПГВ-1000 с моделями внутрикорпусных устройств) (рис. 1). Система подготовки пара, подаваемого в модель, включает в себя линию подачи перегретого пара, линию подачи питательной воды в смеситель, из которого слабоперегретый пар по двум независимым линиям подается в СВД.

Экспериментальная модель представляет собой поперечную «вырезку» натурального парогенератора ПГВ-1000, размещенную вдоль горизонтальной оси СВД диаметром 1670 мм. Длина нижней части модели 2450 мм, ширина модели 100 мм. Вертикальные размеры модели равны натурным.

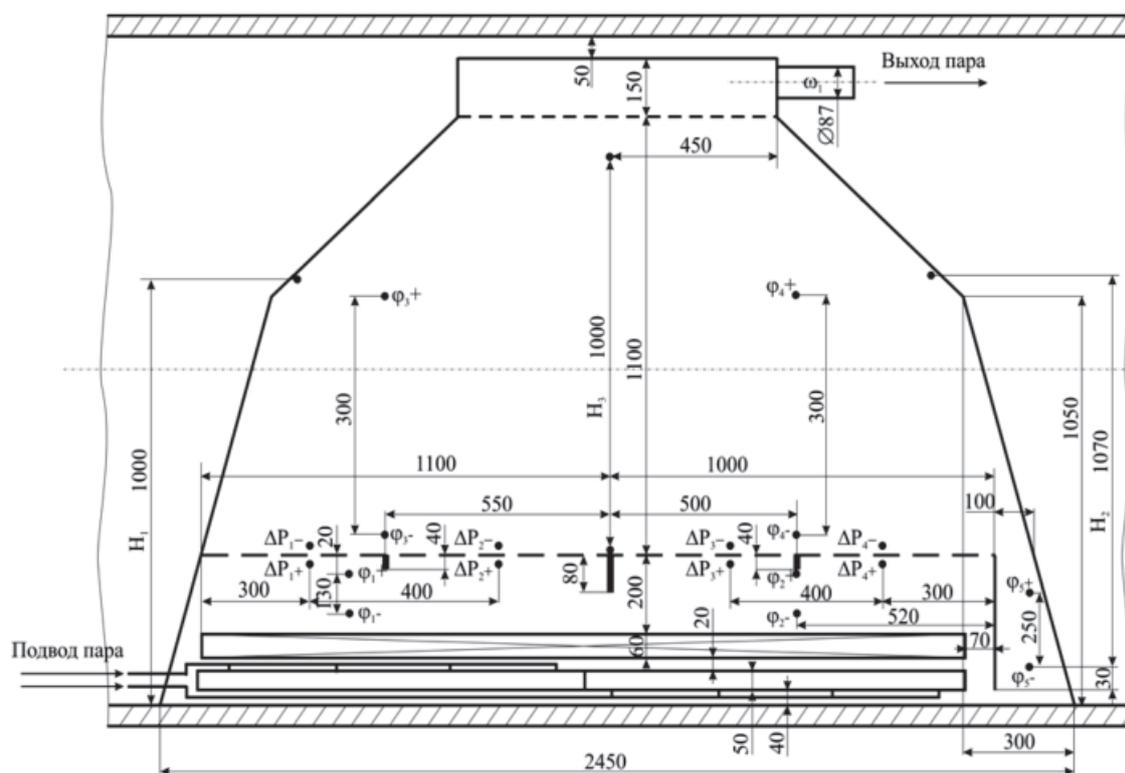


Рис. 1. Рабочий участок стенда ПГВ

Сепарационная схема модели включает в себя основные элементы сепарационной схемы натурального парогенератора (ПГ): погруженный дырчатый лист расположен в нижней части модели, пароприемный дырчатый щит (ППДЩ) находится в верхней части модели. ПДЛ перфорирован отверстиями  $\varnothing 13$  мм, ППДЩ перфорирован отверстиями  $\varnothing 10$  мм. С целью моделирования неравномерности паровой нагрузки в ПГ паровой коллектор был разделен с помощью перегородки на «горячую» и «холодную» половины с отдельной подачей пара. Перфорация ПДЛ равномерная, ее относительное живое сечение  $\Psi = 5,7\%$ . Перфорация ППДЩ равномерная, ее относительное живое сечение  $\Psi = 4,5\%$ . Для обеспечения в модели ПГ изменения скорости пара по высоте парового объема такого же, как в натурном ПГ, паровой объем модели спрофилирован подобно профилю корпуса натурального ПГ.

Конструктивная высота парового объема (расстояние между ПДЛ и ППДЩ) в модели составляет 1100 мм, что практически соответствует натурной высоте парового объема ПГ.

В нижней части модели на расстоянии 200 мм от ПДЛ расположен имитатор трубного пучка, состоящий из трех рядов трубок наружным диаметром 16 мм. Расположение труб в имитаторе пучка коридорное. Вертикальный шаг между трубками – 22 мм, горизонтальный – 24 мм. На расстоянии 20 мм от нижнего ряда трубок имитатора теплообменного пучка расположен коллектор для подачи пара в модель. Паровой коллектор разделен с помощью перегородки на «горячую» и «холодную» половины, на каждую половину подается заданный расход пара.

Экспериментальная установка работает следующим образом. При заданном значении уровня в модели подводимый пар охлаждается в смесителе и с небольшим перегревом (5–10 К) подается в парораздающий коллектор. Пар из парораздающего коллектора барботирует через имитатор трубного пучка и поступает в пространство под ПДЛ. В пространстве под ПДЛ пар растекается и через отверстия в ПДЛ поступает в двухфазный слой над ПДЛ и далее в паровой объем модели. В паровом объеме пар сепарируется, поступает через отверстия ППДЩ в коллектор и затем в сбросной трубопровод модели. Из СВД отсепарированный пар отводится через систему сброса стенда. Вода, вынесенная паром через отверстия ПДЛ, отводится в закраину между корпусом модели и закраиной ПДЛ.

Определение выравнивающей способности листов ПДЛ выполняется с помощью измерения перепада давления на ПДЛ по его длине в четырех точках с отборами над и под ПДЛ.

Для определения величин истинного объемного паросодержания используется гидростатический метод. Под ПДЛ измеряются объемные паросодержания: одно на «горячей» половине и одно на «холодной» половине. Аналогично над ПДЛ также имеются по одному измерению объемного паросодержания на каждой половине листа. Измерения объемного паросодержания производятся путем измерения гидростатических перепадов давления между соответствующими отборами, которые осуществляются с помощью дифманометров типа «Fujii», которые также используются для измерений перепадов давления на ПДЛ.

Абсолютная погрешность всех вышеупомянутых датчиков «Fujii» для использованных верхних границ диапазонов измерений была не более  $\pm 0,01$  кПа.

### Результаты исследования и их обсуждение

На стенде ПГВ были проведены эксперименты по определению гидравлического сопротивления ПДЛ с равномерной перфорацией 5,7%. В этих экспериментах осуществлялась одинаковая подача пара на холодную и горячую стороны модели, различие расходов на горячей и холодной половинах составляло не более 10%.

Суммарный расход подаваемого пара изменялся от 4,23 до 7,94 т/ч, соответствующие приведенные скорости пара на зеркале испарения: 0,15–0,29 м/с. Давление в СВД равнялось 7 МПа.

На рис. 2 показаны распределения перепадов давления на ПДЛ вдоль его длины при трех расходах подаваемого пара, а на рис. 3 – распределения объемного паросодержания под ПДЛ при тех же расходах пара.

Некоторая пространственная неравномерность распределений, представленных на рис. 2, 3, обусловлена небольшим различием значений расходов пара, подаваемых на горячую и холодную стороны (до 10%), а также несимметричностью модели. Слева ПДЛ примыкает непосредственно к стенке модели, а справа ПДЛ имеет закраину, при этом через зазор «закраина – днище корпуса» реализуется циркуляция воды. Циркуляция воды обеспечивает преимущественное поступление воды в «правую» часть модели (ближе к закраине) по сравнению с «левой» (дальней от закраины). Поэтому пар, поступающий из «холодной» стороны парового коллектора, на пути своего движения к ПДЛ испытывает большее гидравлическое сопротивление по сравнению с паром, поступающим со стороны «горячей» стороны парового коллектора. В результате часть пара, подающегося на «холодную» сторону, перетекает на «горячую» сторону.

С увеличением расхода подаваемого пара возрастает перепад давления на ПДЛ (рис. 2). При малых расходах пара истинное объемное паросодержание под ПДЛ относительно небольшое (рис. 3), при увеличении расхода пара истинное объемное паросодержание под ПДЛ на горячей стороне становится близким к 0,92, а на холодной – около 0,84. Таким образом, при достаточно больших расходах пара на части ПДЛ («горячая» сторона) начинает формироваться паровая подушка.

Отметим, что такой же результат был получен в [7], где исследовалась двухфазная гидродинамика в области ПДЛ на водовоздушной барботажной колонке. В этой работе наблюдались лишь локальные области с газосодержанием, близким к единице.

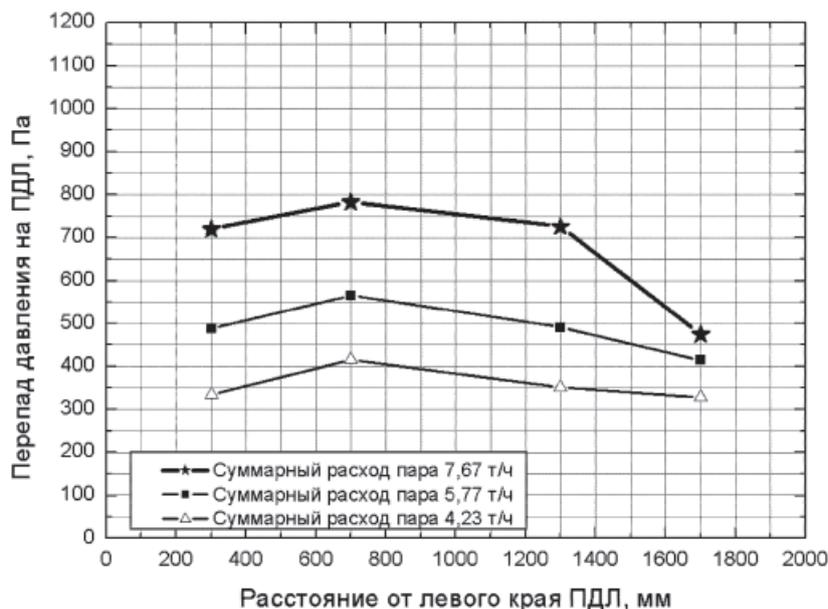


Рис. 2. Распределение перепада давления на ПДЛ при разных расходах подаваемого пара

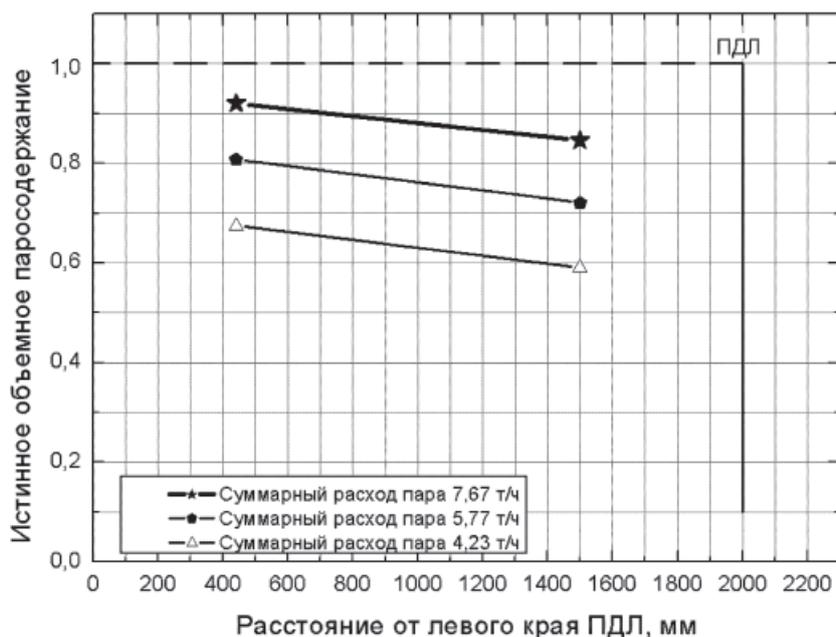


Рис. 3. Распределение объемного паросодержания под ПДЛ при разных расходах подаваемого пара

Во всех выполненных экспериментах выявлена слабая зависимость основных параметров от весового уровня над ПДЛ, поэтому его значения на рисунках не приводятся.

Сопоставление полученных данных по гидравлическому сопротивлению ПДЛ со значениями гидравлического сопротивления листа проходящему через него напорному течению чистого пара выявило следующее. При малых расходах подаваемого пара (низкое объемное паросодержание под ПДЛ) коэффициент гидравлического сопро-

тивления, отнесенный к скоростному напору пара, больше коэффициента гидравлического сопротивления потока чистого пара с тем же расходом. Это объясняется тем, что при малых объемных паросодержаниях под ПДЛ двухфазная смесь весьма гомогенизирована. Её течение через ПДЛ можно рассматривать как течение гомогенной среды с плотностью, большей плотности пара. В то же время при больших расходах подаваемого пара (высокое объемное паросодержание под ПДЛ) имеет место обратная

ситуация: коэффициент гидравлического сопротивления, отнесенный к скоростному напору пара, несколько меньше коэффициента гидравлического сопротивления потока чистого пара с тем же расходом. Возможно, это объясняется тем, что, как отмечалось во введении к статье, ряд факторов (жидкая пленка на стенках отверстий, безнапорный подъем пара почти сразу же за ПДЛ и др.) способствуют уменьшению гидравлического сопротивления листа.

### Выводы

Выполнено экспериментальное исследование двухфазной гидродинамики ПДЛ. Дано описание стенда ПГВ, на котором было выполнено исследование, описана система измерений и методика проведения экспериментов.

Получены распределения перепадов давления на ПДЛ и объемных паросодержаний под ПДЛ при различных расходах равномерно подаваемого пара для ПДЛ с равномерной перфорацией.

Показано, что при малых расходах подаваемого пара (низкое объемное паросодержание под ПДЛ) коэффициент гидравлического сопротивления, отнесенный к скоростному напору пара, больше коэффициента гидравлического сопротивления потока чистого пара с тем же расходом. В то же время при больших расходах подаваемого пара (высокое объемное паросодержание под ПДЛ) имеет место обратная ситуация: коэффициент гидравлического сопротивления, отнесенный к скоростному напору пара, меньше коэффициента гидравлического сопротивления потока чистого пара с тем же расходом.

*Работа выполнена по государственному заданию № 13.1544.2014/К Министерства образования и науки РФ, а также при поддержке РФФИ (проект № 14-08-00388).*

### Список литературы

1. Агеев А.Г., Карасев В.Б., Серов И.Т., Титов В.Ф. Сепарационные устройства АЭС. – М.: Энергоиздат, 1982. – 169 с.
2. Рассохин Н.Г. Парогенераторные установки атомных электростанций. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 384 с.

3. Трунов Н.Б., Логвинов С.А., Драгунов Ю.Г. Гидродинамические и теплохимические процессы в парогенераторах АЭС с ВВЭР. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 318 с.

4. Янссен Э. Потери давления в двухфазном пароводяном потоке при течении через резкие сужения и расширения в области давлений 42–98 АТА // В кн. Достижения в области теплообмена; под ред. В.М. Боришанского. – М.: Мир, 1970. – С. 147–169.

5. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем // Энергия. – 1976. – 296 с.

6. Агеев А.Г., Васильева Р.В., Елкин И.В., Мелихов В.И., Мелихов О.И., Никонов С.М., Парфенов Ю.В., Неровнов А.А., Трошин А.В. Валидация кода STEG на экспериментальных данных // 8-й Международный семинар по горизонтальным парогенераторам. Электрон. дан. – Россия, г. Подольск, ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2010 – № sgpg2010-047. – электрон. опт. диск (CD-ROM).

7. Рябов Г.А., Козлов Ю.В. Экспериментальное исследование гидродинамики погруженных дырчатых листов // Теплоэнергетика. – 1984. – № 8. – С. 62–65.

### References

1. Ageev A.G., Karasev V.B., Serov I.T., Titov V.F. Separationne ustrojstva AES // M.: Energoizdat, 1982, 169 p.
2. Rassohin N.G. Parogeneratornie ustanovki atomnih elektrostantsij // M.: Energoatomizdat, 1987, 384 p.
3. Trunov N.B., Logvinov S.A., Dragunov Yu.G. Gidrodinamicheskie i teplohimicheskie processi v parogeneratorah AES s VVER // M.: Energoatomizdat, 2001, 318 p.
4. Yanssen E. Poteri davleniya v dvuhfaznom parovodyanom potoke pri techenii cherez uzkie suzheniya i rasshireniya v oblasti davlenij 42-98 ATA // V kn. Dostizheniya v oblasti teploobmena. Pod red. Borishanskogo V.M. M.: Mir, 1970, pp. 147–169.
5. Kutateladze S.S., Stirikovich M.A. Gidrodinamika gazozhidkostnih sistem // Energiya, 1976, 296 p.
6. Ageev A.G., Vasileva R.B., Elkin I.V., Melikhov V.I., Melikhov O.I., Nikonov S.M., Parfenov Yu.V., Neronov A.A., Troshin A.V. Validatsiya koda STEG na eksperimentalnih danih // 8-j Mezhdunarodnij seminar po gorizontalmim parogeneratoram. Elektron. dan – Rossiya, g.Podolsk, OKB «GIDRO-PRESS», 2010 no. sgpg2010-047. electron.opt.disk (CD-ROM).
7. Ryabov G.A., Kozlov Yu.V. Eksperimentalnoe issledovanie gidrodinamiki pogruzhennih dirchatih listov // Teploenergetika, 1984, no. 8, pp. 62–65.

### Рецензенты:

Исламов Р.Т., д.ф.-м.н., директор АНО «Международный центр по ядерной безопасности», г. Москва;

Якуш С.Е., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории термогазодинамики и горения, ФГБУН «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского» Российской академии наук (ИПМех РАН), г. Москва.

Работа поступила в редакцию 01.10.2014.