

УДК 532.551; 532.559.8

## Методы снижения гидравлического сопротивления длинных криогенных трубопроводов

Ю.А. Кузма-Кичта, А.В. Лавриков, В.В. Глазков, Р.А. Дуплянкин, К.Е. Мякшина

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Россия

e-mail: kuzma@itf.mpei.ac.ru; VVGlazkov@gmail.com

DOI: 10.34759/tpt-2020-12-7-290-300

Поступила в редакцию 08.07.2020

После доработки 17.07.2020

Принята к публикации 19.07.2020

Рассмотрены методы снижения гидравлического сопротивления в длинных криогенных трубопроводах. Экспериментально исследованы потери давления в длинных трубах в случае облунения, накатки, витых труб и комбинированного метода (облунения и накатки). Результаты экспериментов свидетельствуют, что потери давления в трубах с совместными облунением и накаткой приблизительно на 20% меньше, чем в гладких трубах. Рассмотрена возможность снижения гидравлического сопротивления трубопровода за счет прокачки шуги и использования успокоителей турбулентности, дрейфующих вместе с потоком.

**Ключевые слова:** потери давления, облунение, накатка, витые трубы, шуга, успокоители турбулентности.

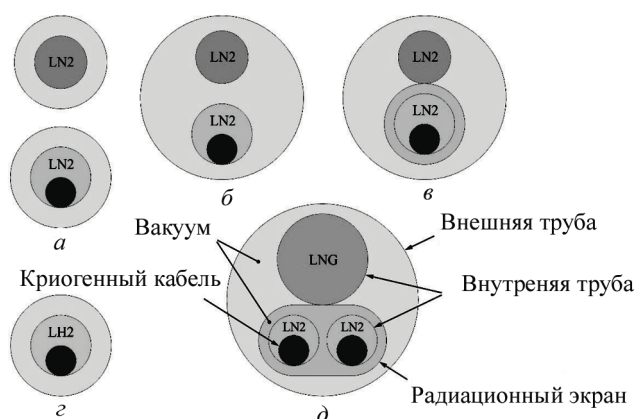
### Введение

В последние годы на мировом энергетическом рынке все большую долю энергоресурсов занимает СПГ, объем которого на мировом

рынке газа составляет более 4.0% от общего объема сырья и продолжает расти. Наряду с этим постоянный рост потребления энергоресурсов, бурное развитие ветроэнергетики и солнечной энергетики требует совершенствования систем передачи и распределения энергии.

В работе [1] была сформулирована идея, что транспортировку электроэнергии и экологически чистого топлива, каким является сжиженный природный газ, можно совместить. Предполагается, что использование высокотемпературных сверхпроводников (high temperature superconductors, HTS) позволит организовать передачу на большие расстояния электроэнергии по сверхпроводящим кабелям и криогенных жидкостей по теплоизолированным трубопроводам в одной системе (рис. 1).

Главной проблемой такой конструкции является поддержание низкой температуры внутри высокотемпературного сверхпроводящего кабеля. Тепло, генерируемое в сверхпроводящем кабеле и проходящее через тепловую изоляцию, нагревает хладагент. Это означает, что необходимо строить станции охлаждения по всему



**Рис. 1.** Схематический рисунок конфигураций криогенных труб, которые могут быть использованы в сверхпроводящих линиях электропередачи различных типов. HTS кабель, охлаждаемый LN2: а – с индивидуальной вакуумной изоляцией; б – с общей вакуумной изоляцией; в – с радиационным экраном. Гибридные системы: г – HTS MgB2 кабель, охлаждаемый LH2; д – HTS кабель, охлаждаемый LN2 с защитным радиационным экраном, охлаждаемым СПГ

маршруту HTS-кабеля. Стоимость проекта будет определяться количеством таких станций на 100 км. Разумеется, качественная теплоизоляция кабеля снизит необходимость слишком частой установки охлаждающих станций. Однако также следует принимать во внимание ограничения, накладываемые на систему достаточно высоким гидравлическим сопротивлением криогенных каналов. Возможные пути решения данной проблемы рассмотрены более подробно далее.

При протекании жидкости в трубопроводах возникает гидравлическое сопротивление, которое ограничивает максимально возможные объемные расходы при прокачке. Гидравлические потери давления при ламинарном течении, как правило, не могут быть изменены без изменения физических свойств перекачиваемой жидкости. Современные методы снижения гидравлического сопротивления (drag reduction methods, DRM) являются эффективными только для турбулентных течений, так как они, ламинаризуя поток, влияют, в первую очередь, непосредственно на переносные характеристики турбулентности.

В целом различают две основные группы методов снижения гидравлического сопротивления:

- снижение гидравлического сопротивления при прокачке за счет модификации свойств поверхности трубы;

- снижение гидравлического сопротивления при прокачке за счет изменения свойств прокачиваемой по трубе жидкости.

Эти две группы методов и будут рассмотрены более подробно, в первую очередь применительно к прокачке криогенных жидкостей. Также некоторое внимание будет уделено альтернативным методам снижения гидравлического сопротивления, поэтому будут рассмотрены возможности ламинаризации потока за счет добавления в него шуги или же погружных успокоительных устройств, дрейфующих вместе с прокачиваемой жидкостью.

### **1. Снижение гидравлического сопротивления путем модификации поверхности трубы**

Эта группа методов включает в себя несколько различных способов изменения параметров поверхности канала [2]. Одним из спо-

собов является использование микро- и наномасштабных интенсификаторов, в том числе создание микрорельефа, копирующего биологические системы.

Как пример, высокая скорость, которую при плавании развивают акулы, в большой мере обусловлена структурой ее кожи, покрытой риблетами, которые представляют собой продольные, ориентированные по потоку ребра или бороздки на поверхности. Эти элементы оказывают влияние на структуру турбулентного течения и обеспечивают снижение сопротивления трения в турбулентном пограничном слое. В настоящее время делаются попытки воссоздать такие структуры искусственно. Эксперименты на искусственных риблетах показывают снижение гидравлического сопротивления на  $\approx 10\%$ , и эта величина, по всей видимости, не предел [3].

Различные методы снижения гидравлического сопротивления и интенсификации теплообмена путем модификации рельефа поверхности каналов, по которым прокачивается жидкость, используются в технике давно. В работе [4] сделан обзор патентов по методам интенсификации теплообмена. Еще в 1877 г. Р.Ф. Пратт и С.Д. Вэйнрайтан получили патент на накатанные трубы для теплообменников с фазовыми переходами. В 1899 г. Дж. Купер получил патент на дискретно-шероховатые трубы для котлов и оснастку для их производства методом накатки профилированными вращающимися роликами. В 1900 г. W.W. Charles получил патент на витые металлические трубы для котлов. В 1941 г. E.F. Spanner получил патент на спирально накатанные трубы для трубчатого теплообменника. В 1966 г. Ф.А. Лоэбела и Х.Х. Гробеккер получили патент на структуру поверхности в виде сферических выемок/выступов для дымогарных труб жаротрубных котлов.

Практика показала, что использование искусственных турбулизаторов потока приводит не только к интенсификации теплообмена, но и к уменьшению гидравлического сопротивления и отложений на поверхности каналов [2, 5, 6].

В качестве наиболее перспективных методов, причем достаточно разработанных, следует выделить следующие четыре варианта модификации поверхности труб:

- трубы с кольцевой накаткой;
- с винтовой накаткой;

- витые трубы;
- облуненные трубы.

### 1.1. Облунение поверхности

В случае покрытия поверхности полусферическими углублениями в приповерхностном слое происходит отрыв и переприсоединение потока [2, 7–9].

Обтекание лунок с относительной глубиной  $h/d > 0.1-0.2$  происходит с отрывом потока. При этом в углублении наблюдается самоорганизующееся смерчеобразное вихревое течение. Вихревые структуры перемещаются в поперечном направлении из одного положения в другое и обратно. Оси вихревых структур наклонены к обтекаемой поверхности.

Время пребывания вихря в обеих половинах полусферы значительно превышает время его перемещения из одной половины полусферы в другую. В лунке возникает циркуляция, в результате которой часть потока выносится во внешнее течение.

### 1.2. Витые трубы

В работе [2] детально описан метод интенсификации теплообмена в витых трубах. Для интенсификации теплообмена используются витые трубы трехлопастного профиля, имеющие большую жесткость. Витая труба трехлопастного профиля может рассматриваться как круглая труба с трехходовой винтовой накаткой. При этом выступы внутри трубы наряду с закруткой дополнительно турбулизуют поток за счет вихреобразования в тонком пристенном слое. По существу, в витой трубе сочетаются два метода интенсификации теплообмена: закрутка потока и накатка.

Как показал эксперимент, при течении жидкости в витых трубах с интенсификаторами существуют два фактора, оказывающих разнонаправленное действие на коэффициент гидравлического сопротивления. Закрутка потока приводит к образованию в пристенном слое периодических областей отрывного течения, что ведет к росту гидравлического сопротивления. С другой стороны, на выпуклых и вогнутых частях профиля витой трубы возникают области с повышенной и пониженной скоростью, что ведет к уменьшению коэффициента гидравлического сопротивления в витых трубах по сравнению с круглыми и гладкими витыми при  $Re > 5000$  [2].

### 1.3. Трубы с кольцевой и винтовой накаткой

Накатка – эффективный метод интенсификации теплоотдачи в трубчатых теплообменных аппаратах. При этом на наружной поверхности трубы образуются периодически расположенные кольцевые или винтовые канавки, а на внутренней – кольцевые выступы с плавным профилем.

Трубы с кольцевыми турбулизаторами достаточно просто изготовить. В таких трубах образуется слой отложений меньшей толщины [2]. Именно в трубах с кольцевой накаткой Г.А. Дрейцер с коллегами [6] обнаружили новую закономерность – опережающий рост коэффициента теплоотдачи по сравнению с увеличением гидравлического сопротивления. Эта закономерность наблюдается в определенном диапазоне размеров и расположения турбулизаторов.

### 1.4. Сравнение различных интенсификаторов теплообмена

В работах [2, 7–9] дано сравнение различных интенсификаторов теплообмена. Для витой трубы согласно имеющимся исследованиям показано, что при  $s/d = 8$  ( $s$  – шаг закрутки витой трубы) получено существенное повышение теплоотдачи при относительно небольшом росте гидравлического сопротивления.

В случае применения облуненных поверхностей при низких числах  $Re$  наблюдается такой же эффект, однако с ростом числа  $Re$  этот эффект ослабляется в большей степени, чем для витых труб. Трубы со спиральной и кольцевой накаткой обеспечивают рост теплопередачи до 60%. Существенный рост теплопередачи с интенсификаторами теплосъема объясняется тем, что в рассмотренных условиях передача тепла происходит при скоростях, соответствующих переходной области от ламинарного к турбулентному течению.

К сожалению, как и следовало ожидать в соответствии с аналогией Рейнольдса, гидравлические потери в системе с интенсификаторами, как правило, растут.

– Кольцевая накатка в трубах вызывает рост отношения  $\Delta p^*/\Delta p$  на 45% ( $\Delta p^*$  – потери давления в исследуемой трубе с интенсификаторами,  $\Delta p$  – соответствующие потери в гладкой трубе).

– Спиральная накатка приводит к повышению отношения  $\Delta p^*/\Delta p$  на 35%.

– Витые трубы приводят к росту отношения  $\Delta p^*/\Delta p$  на 25%.

– Облунение труб – рост на 20%.

В случае образования в процессе работы на поверхности труб отложений роль интенсификаторов оказывается весьма положительной. Так, в промышленных теплообменниках коэффициент теплопередачи для гладкой трубы с течением времени уменьшается в результате образования отложений за 250 ч в 2.5 раза. Коэффициент теплопередачи в случае применения витых труб и труб с кольцевой накаткой вначале уменьшается, затем его значение стабилизируется. Таким образом, эффективность использования интенсификаторов с течением времени возрастает.

Однако имеющиеся опытные данные ограничены, совсем мало исследованы комбинированные методы интенсификации теплообмена.

### 1.5. Оценка теплогидравлической эффективности интенсификаторов на примере промышленных теплообменников

Ниже приведены оригинальные данные испытаний эффективности теплообменников, проведенные на заводе «Сатэкс» В.К. Беляковым. Теплогидравлическую эффективность теплообменников можно оценить, рассмотрев соотношения между ростом теплоотдачи и ростом коэффициента гидравлического сопротивления.

На заводе теплотехнического оборудования «Сатэкс» В.К. Беляков на сертифицированном стенде провел испытания теплообменников с трубами с интенсификаторами теплообмена. Были испытаны теплообменники с облуненными трубами ВВП 168 и ВВП 114, теплообменник ВВП 168 с трубами, имеющими облунение и накатку. При выборе параметров лунок и накатки в трубах теплообменника использован патент [10]. Были исследованы следующие варианты теплообменников:

– теплообменник одномодульный из 37 труб с отношением диаметров 16/14 с облунением: глубина лунок  $h = 0.26–0.44$  мм и диаметр  $d = 1.75–1.90$  мм;

– четырехмодульный теплообменник, в каждом модуле которого по 19 труб с отношением диаметров 16/14 с облунением: глубина лунок  $h = 0.26–0.44$  мм и диаметр  $d = 1.75–1.90$  мм;

– теплообменник одномодульный из 37 труб с отношением диаметров 16/14 с облунением:

глубина лунок  $h = 0.32–0.5$  мм и диаметр  $d = 1.85–2.0$  мм, глубина спиральной накатки  $h/d = 0.26$ .

На рис. 2 представлены результаты испытаний теплообменников в виде зависимости относительного коэффициента теплопередачи  $K/K_{\text{гл}}$  от относительных потерь давления  $\Delta P/\Delta P_{\text{гл}}$ .

Для теплообменника с комбинированным методом интенсификации теплообмена (облунение и накатка), разработанного на основе [10], получен опережающий рост теплопередачи по сравнению с потерями давления, причем величина потерь давления меньше, чем в теплообменнике с гладкими трубами.

В табл. 1 представлены характеристики рассмотренных теплообменников:

– теплообменник «Сатэкс», трубы с облунением;

– теплообменник «Сатэкс» с облунением и накаткой;

– теплообменник ТБН «Энергосервис», трубы с облунением;

– теплообменник с витыми трубами.

Таким образом, для теплообменника с комбинированным методом интенсификации теплообмена (облунение и накатка) получен опережающий рост теплопередачи по сравнению с потерями давления, величина потерь меньше, чем в теплообменнике с гладкими трубами.

Для теплообменника с витыми трубами получен рост коэффициента теплопередачи, сопоставимый с ростом потерь давления.

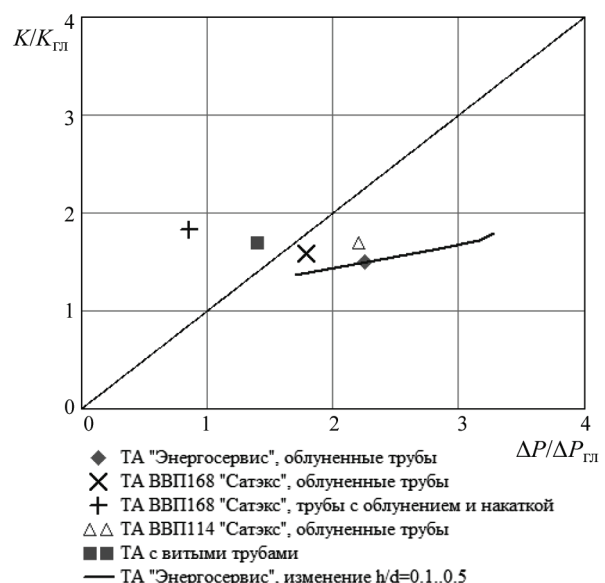


Рис. 2. Теплогидравлическая эффективность различных видов интенсификации теплообмена в теплообменниках

Таблица 1. Характеристики исследуемых теплообменников

Теплообменник	Длина, м	Диаметр кожуха, мм	Число труб	Поверхность, м <sup>2</sup>	Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Потери давления, МПа
«Сатэкс», трубы с облунением	2	168	37	3.49	2678	0.01
«Сатэкс», трубы с облунением и накаткой	2	168	37	3.49	3436	0.007
ТБН «Энергосервис», трубы с облунением	1.3	70	19	0.8	3089	0.011
Теплообменник с витыми трубами	1.3	148	37	1.87	2775	0.009

Для теплообменника ТБН «Энергосервис» с облуненными трубами рост потерь давления опережает рост коэффициента теплопередачи. При изменении параметров облунения рост теплопередачи на 40% сопровождается увеличением потерь давления в два раза.

#### 1.6. Влияние облунения поверхности на процесс образования отложений в трубах

В работах [2, 7–9] представлены данные по влиянию облунения поверхности на отложения в трубах. При трубопроводной прокачке жидкостей важным является процесс образования отложений на стенках трубопровода. Представляет интерес вопрос: как наличие интенсификаторов на поверхности трубы сказывается на процессе образования отложений? Для получения информации по этой проблеме был специально проведен следующий эксперимент.

В корпусе водосчетчика для систем водоснабжения были нанесены лунки. Затем были проведены ресурсные испытания двух водосчетчиков, включенных в одну линию водоснабжения. Один водосчетчик имел корпус с



Рис. 3. Корпусы водосчетчиков для систем водоснабжения с полусферическими лунками (слева) и без лунок (справа) после ресурсных испытаний в течение года

лунками, другой – без лунок. Ресурсные испытания длились один год. Корпус водосчетчика без лунок покрылся отложениями. В корпусе водосчетчика для систем водоснабжения с лунками отложений практически не было обнаружено (рис. 3).

#### 1.7. Выводы по эффективности различных способов модификации поверхности на снижение гидравлического сопротивления трубопроводов

Полученные экспериментальные данные по интенсификации теплообмена и потерям давления при использовании облунения, накатки, витых труб и комбинированного метода интенсификации позволяют сделать следующие выводы.

Для труб с комбинированным методом интенсификации (облунение и накатка), разработанным на основе [10], получен опережающий рост теплопередачи по сравнению с потерями давления, их величина оказалась меньше (на  $\approx 20\%$ ), чем в трубах без интенсификации теплообмена. Таким образом, при создании длинных криогенных трубопроводов использование труб, поверхность которых модифицирована по методу [10], может привести к снижению гидравлических потерь приблизительно на 20%.

## 2. Изменение свойств прокачиваемой по трубе жидкости

Изменение свойств прокачиваемой жидкости при прокачке по трубам полимерными добавками достаточно широко и успешно применяется в трубопроводном транспорте нефтепродуктов и технической воды [11, 12]. С помощью таких добавок удается снизить гидравлическое сопротивление более чем на 80%. Этот эффект известен как эффект Томса. Как показали экс-

перименты, аналогичного, хотя и меньшего по величине эффекта (около 20%), можно добиться при добавлении в прокачиваемую жидкость полимерных нитей с аспектным соотношением длина/диаметр около 30 [13]. Однако внедрение такого способа в перекачку криогенных жидкостей наталкивается на следующие трудности. Полимерные добавки при криогенных температурах застывают. В результате эффект Томса, который обусловлен разворачиванием полимерных клубков высокомолекулярных добавок, проявиться не может. Относительно же введения в поток криогенной жидкости волокон какого-либо рода, необходимо заметить следующее. При криогенных температурах становится возможным осуществлять транспортировку различных видов криогенного сырья в виде шуги. Последняя представляет собой смесь равномерно распределенных твердых частиц (льда) и жидкости одного и того же вещества. При содержании в жидкости до 50% твердой фазы шуга сохраняет свойство текучести, что позволяет осуществлять перекачку сырья криогенными насосными станциями.

В настоящее время прокачка и хранение криогенных жидкостей в виде шуги достаточно активно рассматриваются. Заменяв сжиженный газ на криогенную шугу, становится возможным уменьшить долю отпарного газа и повысить время хранения криогенной жидкости. На сегодняшний день существуют различные способы получения таких суспензий путем внутреннего и внешнего охлаждения.

Твердые частицы шуги оказывают влияние не только на термодинамические свойства криогенной жидкости, но и на ее переносные свойства, в первую очередь на эффективную вязкость. Вязкость раствора жидкости с твердыми сферическими включениями можно оценить по формуле, полученной еще А. Эйнштейном [14]:

$$\eta = \eta_0 \left( 1 + \frac{5}{2} \varphi \right), \quad \varphi = \frac{4\pi R^3}{3} n, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – отношение суммарного объема всех шарообразных частиц к полному объему раствора;  $n$  – концентрация частиц;  $R$  – радиус частицы.

Если форма частиц отличается от шара, то в (1) вводится поправочный коэффициент  $A$ . Его величина определяется экспериментально и зависит от линейных размеров частицы,

Таблица 2. Значения поправочного коэффициента  $A$  для частиц различной формы

$a/b$	1	2	5	10
$A$	2.5	2.91	5.81	13.6

$$\eta = \eta_0 (1 + A\varphi). \quad (2)$$

В табл. 2 приведены ориентировочные значения поправочного коэффициента  $A$  при различных значениях аспектного отношения размеров частицы  $a$  (длина) и  $b$  (диаметр).

Как следует из формул (1) и (2), наличие твердых частиц в жидкости приводит к увеличению эффективной вязкости смеси, причем сильно вытянутая форма частиц может увеличивать это влияние на порядки. Легко оценить, что при аспектном соотношении для ледяных иголок  $a/b = 30$  и объемной концентрации льда  $\varphi = 0.3$  эффективная вязкость шуги возрастает в 15 раз. Это позволяет уменьшить во столько же раз число Рейнольдса. Из этого можно сделать вывод, что введение в криогенный поток иглообразных частиц льда позволит снизить гидравлическое сопротивление при прокачке ламинаризацией течения. Ламинаризация режима течения будет осуществляться за счет увеличения эффективной вязкости потока и подавления турбулентных микровихрей.

### 3. Использование дрейфующих успокоителей потока для снижения гидравлического сопротивления при прокачке

#### 3.1. Использование разделительных пробок при перекачке жидкости по трубам и их возможное влияние на уровень турбулентности в потоке

На сегодняшний день в мире довольно широко применяют метод последовательной перекачки различных жидкостей по одному и тому же трубопроводу. Для этого в поток вводятся специальные устройства (разделительные пробки или поршни), дрейфующие по трубе вместе с прокачиваемой жидкостью (рис. 4). Разделительные поршни представляют собой монолитные конструкции (они часто выполняются из полиуретана) или манжеты специальной формы, заполняющие собой все проходное сечение трубопровода и движущиеся в трубопроводе со



Рис. 4. Разделительные поршни и очистные скребки для трубопроводов: 1 – манжетного типа; 2 – цельных полиуретановые

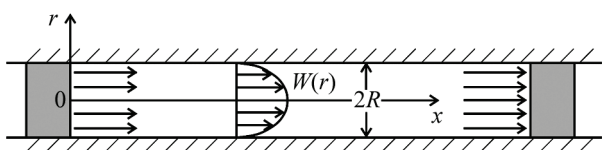


Рис. 5. Модель прокачки жидкости по трубопроводу с периодическим расположением разделительных пробок

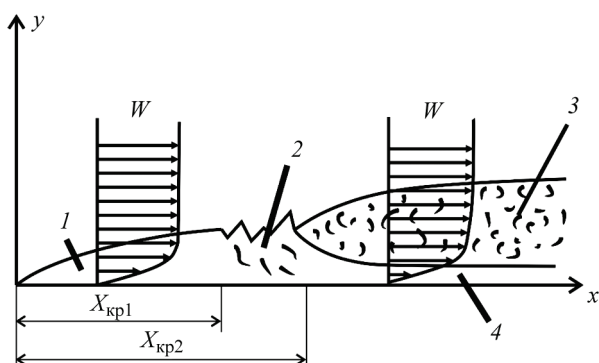


Рис. 6. Развитие пограничного слоя вблизи разделительной пробки: 1 – ламинарный пограничный слой; 2 – переходная область; 3 – турбулентный пограничный слой; 4 – ламинарный подслои

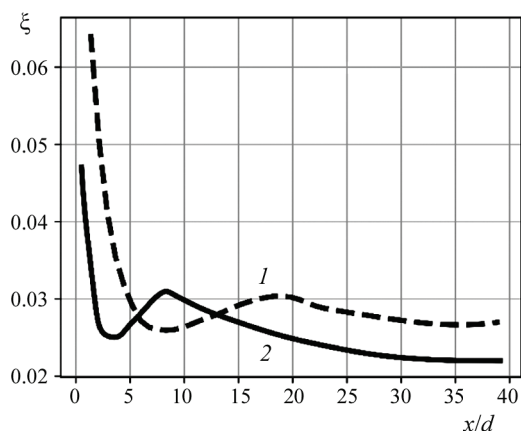


Рис. 7. Экспериментально полученная зависимость коэффициента сопротивления от безразмерной длины канала [16]: 1 –  $Re = 10^4$ ; 2 –  $Re = 2.5 \cdot 10^4$

средней скоростью прокачиваемой жидкости. Аналогичные устройства (так называемые очистные скребки) часто используются для очистки внутренней поверхности трубопровода от отложений [15].

Для снижения гидравлического сопротивления при прокачке жидкости по трубопроводу разделительные поршни представляют интерес исходя из следующих соображений.

Если две разделительные пробки идут в трубопроводе друг за другом, как показано на рис. 5, в окрестности пробок профиль скорости в жидкости является стержневым. Это означает, что перед каждой пробкой и за ней течение развивается аналогично тому, что наблюдается на начальном участке при входе потока в трубу (рис. 6), и вплоть до расстояния между пробками  $x_{кр2}$  течение будет оставаться ламинарным.

Это, в свою очередь, означает, что если расстояние между разделительными пробками будет меньше  $L = 2x_{кр2}$ , можно ожидать, что течение жидкости между пробками будет оставаться ламинарным и потери давления при прокачке будут минимальны. Особый интерес данная идея представляет для прокачки криогенных жидкостей, так как в качестве разделительных пробок могут выступать специально созданные структуры из шуги (рыхлого льда) прокачиваемой жидкости. Экспериментальным подтверждением этой идеи, по всей видимости, можно считать экспериментально полученную зависимость коэффициента сопротивления от безразмерной длины канала [16] (рис. 7). Как видно на рисунке, при  $Re = 10^4$  и приведенной длине канала  $x/d = 10$  коэффициент гидравлического сопротивления канала меньше, чем для длинной трубы.

### 3.2. Аналитическое решение задачи о гидравлическом сопротивлении при ламинарном движении жидкости между разделительными пробками

Очевидно, что при ламинарном течении жидкости по трубопроводу введение в него разделительных пробок может привести только к росту гидравлического сопротивления трубопровода. Однако из методических соображений полезно получить приближенное аналитическое решение данной задачи. Это решение мы получаем из уравнения движения для продольной составляющей скорости и граничных условий

симметрии сечения трубопровода и прилипания на стенке.

Очевидно, что коэффициент гидравлического сопротивления при большом расстоянии между пробками соответствует формуле Пуазейля:

$$\xi_{lam} = \frac{64}{Re}. \quad (3)$$

Для рассмотрения значения этой величины на начальном гидродинамическом участке воспользуемся решением Тарга [17]. Обобщенная формула для гидродинамического коэффициента сопротивления принимает вид

$$\xi_{eff} = \frac{64}{Re} \left( 1 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} e^{-4\beta_k^2 \chi} \right), \quad (4)$$

где  $\chi = x/(Re \cdot d)$  – безразмерное расстояние от разделительной пробки;  $\beta_k$  – корни функции Бесселя 1-го рода второго порядка.

Результат, как и ожидалось, получился отрицательным (рис. 8). При ламинарном режиме течения использование разделительных пробок не приведет к желаемому эффекту.

### 3.3. Численное моделирование течения жидкости между разделительными пробками в трубопроводе при турбулентном режиме течения

Для турбулентного режима течения получить аналитическое решение не представляется возможным. Поэтому было проведено численное моделирование течения жидкости между разделительными пробками в трубопроводе при турбулентном режиме течения. Рассматривалась задача о стационарном течении жидкости в магистральном трубопроводе диаметром  $D$  между двух чистящих скребков на расстоянии  $L$  между ними (рис. 5). Решалась стационарная двумерная задача в цилиндрической системе координат. Для проведения численных оценок использовались следующие параметры:

- среднemasсовая скорость течения  $W_0$  – 3 м/с;
- плотность  $\rho$  – 850 кг/м<sup>3</sup>;
- кинематическая вязкость  $\nu$  –  $3.5 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с;
- диаметр трубы  $D$  – 1 м.

Соответствующее число Рейнольдса для задачи  $Re = W_0 D / \nu = 8.5 \cdot 10^4$ .

Задача решалась в осесимметричной постановке в системе ANES, разработанной на кафедре Инженерной теплофизики НИУ «МЭИ». Для моделирования турбулентности использо-

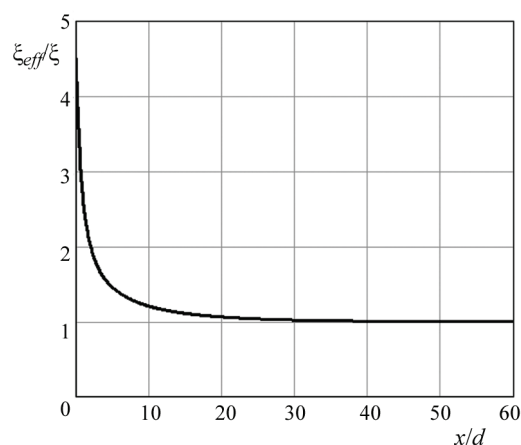


Рис. 8. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от безразмерного расстояния между разделительными пробками

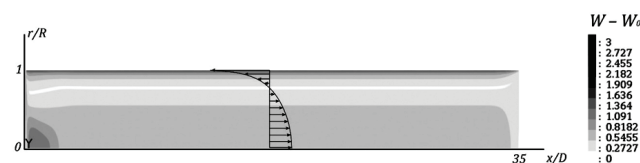


Рис. 9. Распределение относительной продольной скорости  $W/W_0$  в полости между разделительными пробками, находящимися на расстоянии  $x/D = 35$



Рис. 10. Распределение относительной турбулентной вязкости  $\nu_{turb}/\nu$  в полости между разделительными пробками, находящимися на расстоянии  $x/D = 35$

валась стандартная  $k-\epsilon$  модель с пристеночными функциями Сполдинга–Лаундера (неравновесные функции). Некоторые результаты расчетов представлены на рис. 9 и 10.

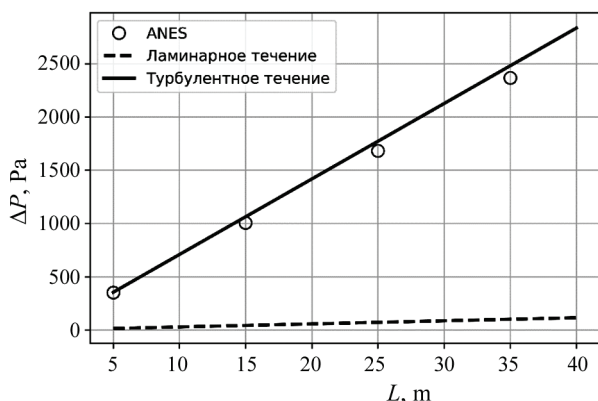
Перепад давления между разделительными пробками, полученный в численном эксперименте, сравнивался с расчетом по формуле Дарси–Вайсбаха:

$$\Delta P = \xi \frac{\rho V^2}{2} \frac{x}{D},$$

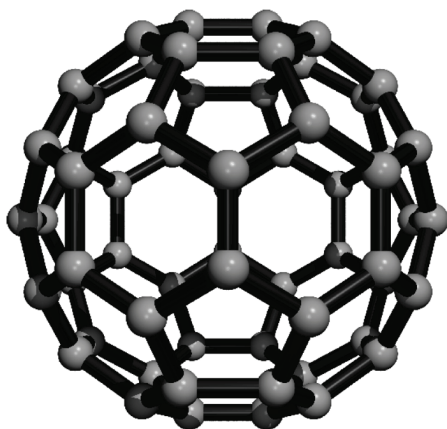
где для ламинарного течения коэффициент гидравлического сопротивления определялся по формуле Пуазейля (3), а для турбулентного течения использовалась формула Блазиуса

$$\xi_{turb} = \frac{0.3164}{Re^{1/4}}.$$





**Рис. 11.** Перепад давления между разделительными пробками. Сравнение численных расчетов в системе ANES с расчетами по формуле Дарси-Вейсбаха для ламинарного и турбулентного течений



**Рис. 12.** Погружная успокоительная решетка (возможный вариант) изо льда или шуги, дрейфующая в трубопроводе со средней скоростью потока

Результаты сравнения представлены на рис. 11. Можно видеть, что существенных отличий перепада давления между разделительными пробками от стабилизированного турбулентного течения в круглой трубе не наблюдается.

Как следует из проведенных расчетов, использование разделителей потока для снижения гидравлического сопротивления при прокачке в области исследованных параметров не приводит к желаемому результату. Из этого, однако, не следует, что искомый результат не может быть достигнут при другом наборе параметров.

Представляет также интерес рассмотреть возможность введения в поток погружных успокоительных решеток (рис. 12). Подобные структуры, выполненные из шуги, могут свободно дрейфовать со средней скоростью потока и действовать аналогично успокоительным решеткам, применяемым для уменьшения уровня

турбулентности в аэродинамических трубах. Разумеется, данный вопрос нуждается в дополнительном экспериментальном исследовании и численном моделировании.

## Выводы

Проведен краткий обзор современных методов снижения гидравлического сопротивления в трубопроводах.

Получены оригинальные данные по интенсификации теплообмена и потерям давления при использовании облучения, накатки, витых труб и комбинированного метода интенсификации. Для труб с комбинированным методом интенсификации (облучение и накатка), разработанным на основе [10], получен опережающий рост теплопередачи по сравнению с потерями давления, их величина оказалась меньше (приблизительно на 20%), чем в трубах без интенсификации теплообмена. Таким образом, при создании длинных криогенных трубопроводов использование труб, поверхность которых модифицирована по методу [10], может привести к снижению гидравлических потерь приблизительно на 20%.

Показано, что введение в криогенный поток иглообразных частиц льда позволит снизить гидравлическое сопротивление при прокачке за счет ламинаризации течения. Наличие твердых частиц в жидкости приводит к увеличению эффективной вязкости смеси, причем сильно вытянутая форма частиц может увеличивать это влияние на порядки. При аспектном соотношении для ледяных иголок  $a/b = 30$  и объемной концентрации льда  $\phi = 0.3$  эффективная вязкость шуги возрастает в 15 раз. Это позволяет уменьшить во столько же раз число Рейнольдса и перейти из турбулентного режима течения в ламинарный.

Рассмотрена возможность введения в прокачиваемую криогенную жидкость разделительных пробок (в том числе из шуги и льда) для ламинаризации потока. Было проведено численное моделирование течения жидкости в пространстве между разделительными пробками. Оно показало нейтральный характер влияния пробок на уровень турбулентности и гидравлические потери при прокачке жидкости по трубам и не выявило положительного влияния разделительных пробок на уровень гидравлических потерь в трубопроводе. Однако имеющиеся

экспериментальные данные позволяют надеяться, что будет найден диапазон параметров, при котором данный метод может оказаться эффективным.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузма-Кичта Ю.А., Глазков В.В., Иванов Ю.В., Мякшина К.Е., Ямагучи Сатару. СПГ: перспективные сферы применения и проблемы транспортировки на большие расстояния // Тепловые процессы в технике. 2019. Т. 11. № 4. С. 170–184.
2. Dzyubenko B.V., Kuzma-Kichta Yu.A., Leontiev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P. Intensification of heat and mass transfer on macro-, micro-, and nanoscales. Begell. 2016. 630 p.
3. Литвиненко Ю.А., Чернорай В.Г., Козлов В.В., Лефдаль Л.А., Грек Г.Р., Чун Х. Влияние риблет на развитие  $\Lambda$ -структуры и ее преобразование в турбулентное пятно // Доклады АН. 2006. Т. 407. № 2. С. 194–197.
4. Попов И.А., Махянов Х.М., Гуреев В.М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена: Интенсификация теплообмена. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 560 с.
5. Кикнадзе Г.И., Краснов Ю.К. Эволюция смерчеобразных течений вязкой жидкости // Доклады АН СССР. 1986. Т. 290. № 6. С. 1315–1319.
6. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
7. Леонтьев А.И., Алексеенко С.В., Волчков Э.П., Дзюбенко Б.В., Драгунов Ю.Г., Исаев С.А., Коротеев А.А., Кузма-Кичта Ю.А., Попов И.А., Терехов В.И. Вихревые технологии для энергетики / Под общ. ред. акад. А.И. Леонтьева. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. 328 с.
8. Kuzma-Kichta Yu.A., Leontiev A. Choice and justification of the heat transfer intensification methods // Journal of Enhanced Heat Transfer. 2018. V. 25. Special Iss. 6. P. 465–564.
9. Isaev S., Popov I., Leontiev A., Chudnovsky Y. Vortex heat transfer enhancement in narrow channels with a single oval-trench dimple oriented at different angles to the flow // Journal of Enhanced Heat Transfer. 2018. V. 25. Special Iss. 6. P. 579–604.
10. Беляков В.К., Кузма-Кичта Ю.А. Теплообменная труба / Патент Российской Федерации № 2221976 от 20.01.2004.
11. Белоусов Ю.П. Противотурбулентные присадки для углеводородных жидкостей. М.: Наука, 1986. 144 с.
12. Grabowski D.W. Drag reduction in pipe flows with polymer additives. PhD Thesis. Rochester Institute of Technology. 1990.
13. Lee W.K., Vaseleski R.C., Metzner G.B. Turbulent drag reduction in polymeric solutions containing suspended fibers // AIChE Journal. 1974. V. 20. N 1. P. 128–133.
14. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. 1962.
15. Мустафин Ф.М. и др. Промысловые трубопроводы и оборудование: учебное пособие для вузов. М.: Недра, 2004. 662 с.
16. Трубаков Ю.П., Габрианович Б.Н., Левченко Ю.Д. Исследование турбулентного потока жидкости во входном участке круглой трубы // Изв. АН БССР. Сер. физико-энергетических наук. 1976. № 2. С. 89.
17. Слезкин Н.А. Динамика вязкой несжимаемой жидкости. М.: ГИТТЛ, 1955. 521 с.

### Methods to reduce drag losses of long cryogenic pipelines

Yu.A. Kuzma-Kichta, A.V. Lavrikov, V.V. Glazkov, R.A. Duplyankin, K.E. Miakshina

National research University «MPEI», Moscow, 111250, Russia  
e-mail: kuzma@itf.mpei.ac.ru; VVGlazkov@gmail.com

Various methods of reducing hydraulic resistance in long cryogenic pipelines are considered. The loss of pressure in long tubes in the case of dimpled, rolling, twisted pipes and the combined method (dimpled and rolling) has been experimentally investigated. The results of the experiments show that the loss of pressure in the pipes with joint dimples and rolling is about 20% less than in smooth pipes. The possibilities of reducing hydraulic resistance of the pipeline by pumping slush and using turbulence-damping screens drifting along with the flow are considered.

**Keywords:** pressure loss, dimples, twisted pipes, slush, drifting turbulence-damping screen.

### REFERENCES

1. Kuzma-Kichta Yu.A., Glazkov V.V., Miakshina K.E., Ivanov Yu.V., Satarou Yamaguchi. SPG: perspektivnyye sfery primeneniya i problem transportirovki na bol'shie rastoyaniya [LNG: promising areas of application and problems of transportation over long distances]. *Teplovye protsessy v tekhnike – Thermal processes in engineering*, 2019, vol. 11, no. 4 pp. 170–184. In Russ.
2. Dzyubenko B.V., Kuzma-Kichta Yu.A., Leontiev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P. Intensification of heat and mass transfer on macro-, micro-, and nanoscales. Begell, 2016. 630 p.
3. Litvinenko Yu.A., Chernoray V.G., Kozlov V.V., Grek G.R., Loeffdahl L., Chun H.H. The influence of riblets on the development of a  $\lambda$  structure and its transformation into a turbulent spot. *Doklady Physics*, 2006, vol. 51, no. 3, pp. 144–147.

4. **Popov I.A., Makhyanov H.M., Gureev V.M.** *Fizicheskie osnovy i promyshlennoe primeneniye intensivatsii teploobmena: Intensifikatsiya teploobmena* [Physical foundations and industrial applications of heat transfer intensification. Heat transfer intensification]. Kazan: Center for Innovative Technologies, 2009. 560 p. In Russ.
5. **Kiknadze G.I., Krasnov Yu.K.** Evolyutsiya smercheobraznykh techeniy vyazkoj zhidkosti [Evolution of spout-like flows of a viscous fluid]. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1986, vol. 290, no. 6, pp. 1315–1319. In Russ.
6. **Kalinin E.K., Dreitser G.A., Yarkho S.A.** *Intensifikatsiya teploobmena v kanalakh* [Intensification of heat transfer in channels]. Moscow: Mashinostroenie, 1990. 208 p. In Russ.
7. **Leontiev A.I., Alekseenko S.V., Volchkov E.P., Dzyubenko B.V., Dragunov Yu.G., Isaev S.A., Koroteev A.A., Kuzma-Kichta Yu.A., Popov I.A., Terekhov V.I.** *Vikhrevyye tekhnologii dlya ehnergetiki* [Vortex technologies for power engineering]. Moscow: Publishing house MPEI, 2016. 328 p. In Russ.
8. **Kuzma-Kichta Yu., Leontiev A.** Choice and justification of the heat transfer intensification methods. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2018, vol. 25, no. 6, pp. 465–564.
9. **Isaev S., Popov I., Leontiev A., Chudnovsky Y.** Vortex heat transfer enhancement in narrow channels with a single oval-trench dimple oriented at different angles to the flow. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2018, vol. 25, no. 6, pp. 579–604.
10. **Belyakov V.K., Kuzma-Kichta Yu.A.** *Teploobmennaya truba* [Heat exchanger tube]. Patent RF, no. 2221976, 2004.
11. **Belousov Yu.P.** *Protivoturbulentnyye prisadki dlya uglevodородnykh zhidkostey* [Turbulent additives for hydrocarbon fluids]. Moscow: Nauka, 1986. 144 p. In Russ.
12. **Grabowski D.W.** *Drag reduction in pipe flows with polymer additives*. PhD Thesis. Rochester Institute of Technology. 1990.
13. **Lee W.K., Vaseleski R.C., Metzner G.B.** Turbulent drag reduction in polymeric solutions containing suspended fibers. *AIChE Journal*, 1974, vol. 20, no. 1, pp. 128–133.
14. **Landau L.D., Lifshitz E.M.** *Teoreticheskaya fizika. T. VI. Gidrodinamika* [Theoretical physics. T. VI. Hydrodynamics]. Moscow: Nauka, 1962. In Russ.
15. **Mustafin F.M., et al.** *Promyslovyye truboprovody i oborudovanie* [Production pipelines and equipment]. Moscow: Nedra, 2004. 662 p. In Russ.
16. **Trubakov Yu.P., Gabrianovich B.N., Levchenko Yu.D.** Issledovanie turbulentnogo potoka zhidkosti vo vkhodnom uchastke krugloy truby [Investigation of turbulent fluid flow in the inlet section of a circular pipe]. *Izv. Academy of Sciences of the BSSR. Ser. physical and energy sciences – Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physico-technical series*, 1976, no. 2, p. 89.
17. **Slezkin N.A.** *Dinamika vyazkoj neszhimaemoj zhidkosti* [Viscous incompressible fluid dynamics]. Moscow: GITTL, 1955. 521 p. In Russ.