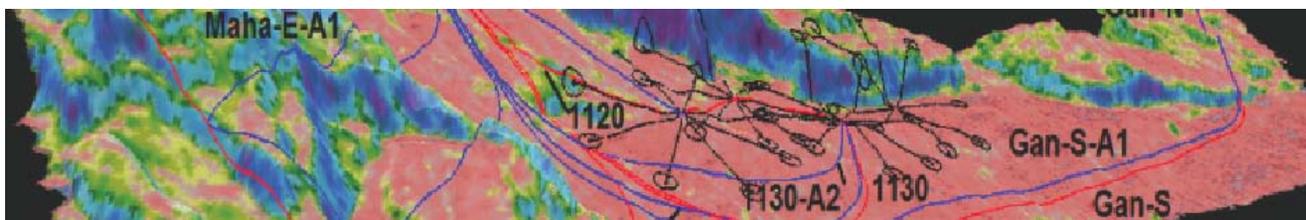


Применение усовершенствованных средств анализа методом конечных элементов для расчета и моделирования подводных нефте- и газопроводов и их узлов

ЧАСТЬ 2

The use of Advanced Finite Element Analysis Tools for the Design and Simulation of Subsea Oil and Gas Pipelines and Components

PART 2



Пол Джукс, доктор философии, серт. инженер, сотрудник Научно-исследовательского и проектного института морских сооружений

Айман Элтахер, доктор философии, проф. инженер

Джеймс Вонг, магистр наук

Билли Дюрон, бакалавр наук

Компания «Джей-Пи Кенни»

Хьюстон, шт. Техас, США

Paul Jukes PhD CEng FIMarEST

Ayman Eltahir PhD PE

James Wang MSc

Billy Duron BSc

J P Kenny, Inc.

Houston, TX USA

1. Расчеты трубопроводов для эксплуатации в арктических условиях

При расчетах трубопроводов, предназначенных для эксплуатации в арктических условиях, требуется учет ряда факторов, не рассматриваемых при проектировании для других регионов. К таким факторам относятся условия нагружения трубопроводов, в том числе в связи с ледовой эрозией дна, таянием многолетней мерзлоты и ледовой экзарации. Сам по себе расчет вертикальных выгибов и прогибов трубопроводов в связи с ледовой эрозией дна схож с аналогичными видами расчетов трубопроводов за пределами арктических регионов. Тем не менее расчеты для арктических условий связаны со значительными сложностями при определении исходных условий, таких как длина пролетов между точками опоры.

Для расчета поведения трубопровода с учетом просадки в результате таяния многолетнемерзлых грунтов требуется проведение отдельных или совместных расчетов следующих факторов: кондуктивная и конвективная теплопередача от трубопровода к грунтам и слою многолетней мерзлоты, изменение объема в связи с таянием льда

1. Pipeline Analysis for Arctic Applications

Analysis of pipelines in arctic conditions requires specialized considerations that do not apply to non-arctic fields. These considerations include loading conditions such as those associated with strudel scour, permafrost thawing and ice gouging. Analysis of upheaval buckling and free spanning associated with strudel scour is rather similar to that for non-arctic applications; the main difference is, however, in deriving the problem parameters (such as the free span length).

Analysis of the pipeline for settlement due to permafrost thawing involves a coupled or an uncoupled form of the following analyses: conduction and convection of the heat from the pipeline to the soil and permafrost; volume change due to the phase change of the permafrost ice; and soil consolidation and resulting settlement. A wide range of sophistication and degree of coupling of these analyses has been proposed, while development of a standard approach to such analysis is still underway. Finite element is usually used for the thermal analysis, with the volume change and consolidation commonly performed with simplified methods. Finite element, however, has been used to perform all the three types of analysis. Analysis of ice gouging of arctic seabed and resulting sub-gouge soil

в составе многолетнемерзлого грунта и консолидация грунтов, ведущая к просадкам. В настоящее время существует целый ряд методов комплексного расчета упомянутых факторов, но единый подход к решению подобных задач пока не выработан. Обычно для анализа термодинамических процессов применяется метод конечных элементов, в то время как расчеты изменения объема и консолидации обычно выполняются по упрощенным методикам. Тем не менее метод конечных элементов может применяться для всех трех упомянутых видов расчетов.

Расчет ледовой экзарации морского дна в арктических условиях и обусловленной ей деформации нижележащих пород (и проложенных в траншеях трубопроводов) обычно выполняется одним из следующих методов.

Первый метод заключается в моделировании грунтов морского дна как набора нелинейно-упругих элементов, деформирующихся под нагрузкой, создаваемой айсбергом или торосом, и передающих ее на заглубленный трубопровод. Более корректный способ расчета методом конечных элементов связан с моделированием пород морского дна как эйлеровой сетки, а менее деформируемых объектов, таких как трубопроводы, - как лагранжевой сетки. Комбинированная методика с использованием эйлеровых и лагранжевых сеток (CEL) обладает тем преимуществом, что она позволяет моделировать экстремальные условия деформации грунта без ущерба для точности оценки напряжений в трубопроводе. Пример результата расчетов по этой методике приведен на [рис. 1](#) [6].

2. Локальный расчет подводных узлов трубопроводной системы методом конечных элементов

Для моделирования подводных трубопроводов и их узлов, включая узлы прохода через стенки, фланцы и элементы крепления стояков, также используется программа ABAQUS. На [рис. 2](#) показана типичная модель узла прохода двустенного трубопровода через стенки, созданная в программе ABAQUS CAE. Функциональные возможности программы ABAQUS позволяют выборочно задавать для каждого компонента значения давления и температуры, на основе которых можно оценить поведение конструкции в заданных условиях. Имеющиеся в программе макросы позволяют определять значения напряжений и подразделять их на изгибные, мембранные и мембранно-изгибные. После этого полученные данные оцениваются на предмет соответствия установленным требованиям. Такая методика также может применяться для оценки напряжений в поперечных швах трубопроводов (см. [рис. 3](#)).

Метод объемных конечных элементов может также применяться для моделирования узлов

(and buried pipeline) deformation is performed usually using either of two approaches.

The first models the seabed soil as nonlinear springs that deforms under the iceberg/ice ridge pressure and that transfers the load to the buried pipeline. The more sophisticated finite element approach involves modelling the seabed soil with an Eulerian mesh, and the less deformable objects, such as the pipeline, are modelled with a Lagrangian mesh. This "Coupled Eulerian-Lagrangian" (CEL) formulation has the advantage of being able to model the extreme soil deformations involved, while keeping good track of the stresses in the pipeline. An example of such analysis output is shown in [Figure 1](#) [Ref. 6].

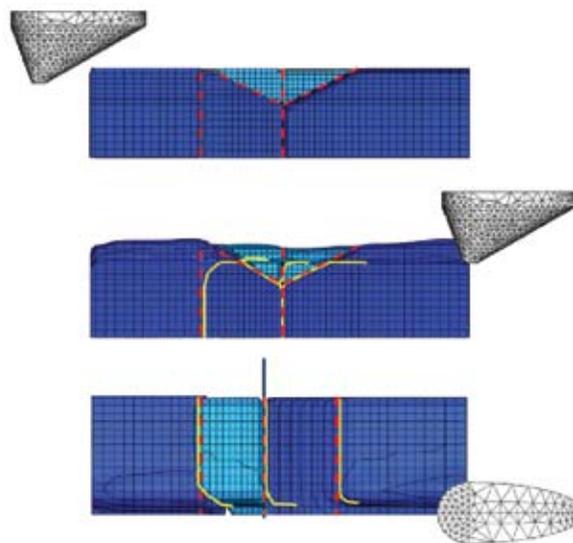


Рис. 1. Деформация под зоной ледовой экзарации по данным расчета методом конечных элементов с использованием сочетания эйлеровой и лагранжевой сеток

Figure 1: Sub-gouge Deformation derived using Coupled Eulerian-Lagrangian Finite Element Formulation

2. Local Finite Element Analysis of Subsea Components

ABAQUS is also used to model subsea pipelines and components such as Bulkheads, Flanges and Riser clamps. A typical pipe-in-pipe bulkhead is shown in [Figure 2](#) and this is constructed using ABAQUS CAE. Using ABAQUS the component can be loaded with pressure, temperature, and the structural response can be obtained. Macros are used to extract stresses, and to then split them into bending, membrane, and membrane and bending stresses. Appropriate code checks are then undertaken. The analysis can also be used to assess the stress loading in the girth welds as shown in [Figure 3](#).

Solid FEA can also be used to design subsea components such as clamp-on buckle arrestors which are proposed to be used for reel lay as shown in [Figure 4](#) [Ref. 7]. FEA allows to study the phenomena of collapsing/propagating of the pipe-in-pipe flowline,

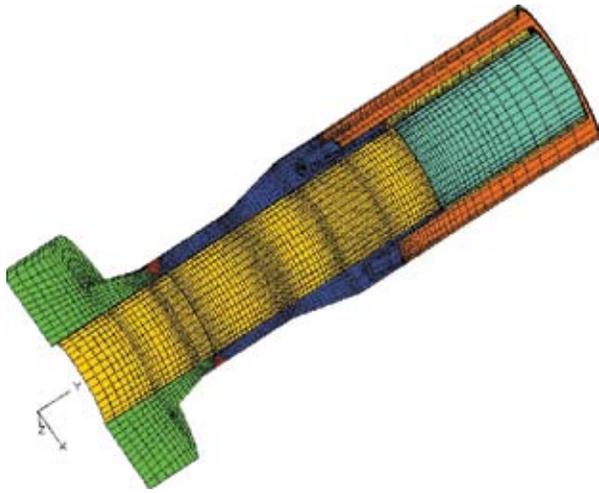


Рис. 2: Комплексное объемное моделирование узлов прохода через стенки
Figure 2: Complex Solid Modelling of Pipeline Bulkheads

подводных трубопроводов, таких как муфты для защиты от распространения смятия при укладке трубопровода с барабана (см. рис. 4) [7]. Метод конечных элементов позволяет анализировать явления смятия и распространения деформаций в подводных двустенных трубопроводах (типа «труба в трубе»), а также оценивать эффективность применения муфт для защиты от распространения смятия при укладке глубоководных трубопроводов. Такая методика позволяет выполнить оценку влияния основных расчетных характеристик на поведение трубопровода с целью получения исходных данных для рабочего проектирования муфт, препятствующих распространению смятия.

3. Микромоделирование (локальное моделирование)

Метод микромоделирования может использоваться для расчета напряжений в кольцевых швах трубопровода (см. рис. 5 и 6). При этом также возможен учет влияния радиальной несоосности труб и дефектов шва в техническом анализе критичности (ECA).

Метод конечных элементов открывает широкие возможности для проектировщиков и позволяет анализировать сложные явления на локальном и микроскопическом уровне.

Комплексный подход к обоснованию трасс трубопроводов

Выбор трасс подводных газо- и нефтепроводов связан с рядом особых обстоятельств и сложностей. Для выбора трасс используется комплекс программных средств, в состав которого входят средства сторонних поставщиков и программа анализа напряжений (см. рис. 7).

Получаемые трехмерные модели используются для визуализации существующих и возможных трасс

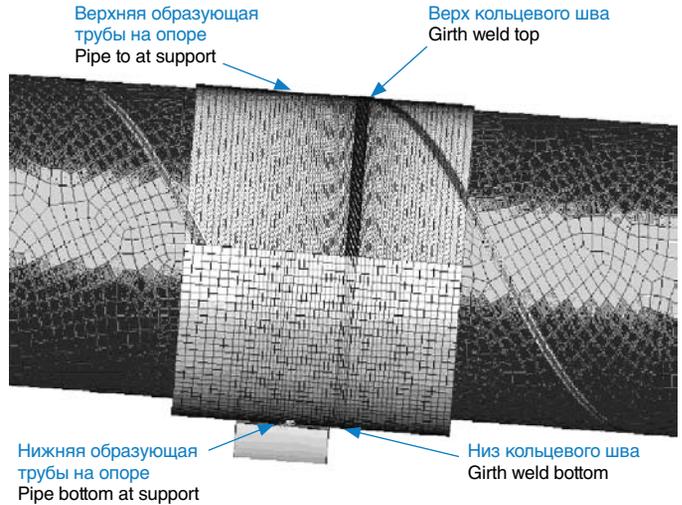


Рис. 3: Детальное моделирование кольцевых швов
Figure 3: Detailed Modelling of Girth Welds

and to investigate the effectiveness of clamp-on buckle arrestor for deep water flowlines. Sensitivities of key design parameters can then be explored with the purpose of guiding detail mechanical design of the clamp-on buckle arrestor.

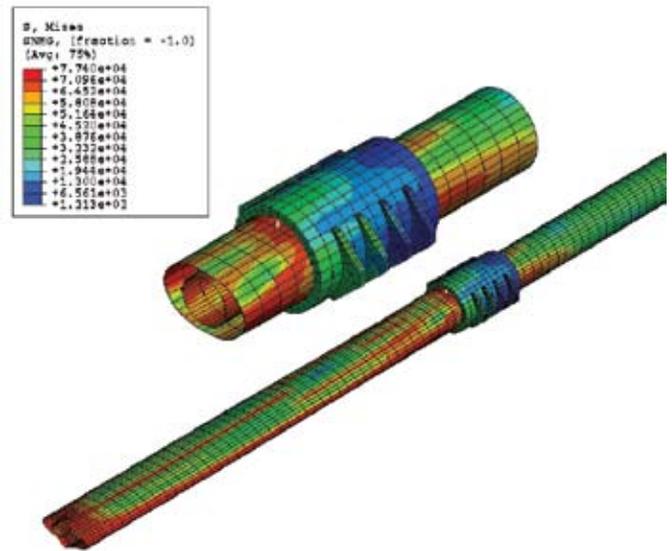


Рис. 4: Муфты для защиты от распространения смятия
Figure 4: Clamp-on Buckle Arrestors

3. Micro Modelling (Sub-Modelling)

The adoption of sub-modelling can be used, to analysis the stress loading in the girth welds as shown in Figure 5 and Figure 6. The effects of radial misalignment, flaw defects, and linking this to Engineering Criticality Assessment (ECA) can also be undertaken. The use of a FEA as a design tool is very powerful, and allows one to address very complex issues at a micro level.

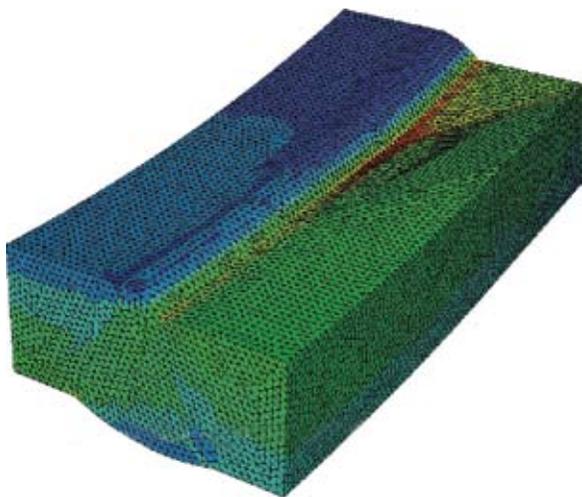


Рис. 5: Детальная модель сварного шва с радиальной несоосностью
Figure 5: Detailed Modelling of Weld Detail with Radial Misalignment

трубопроводов. Учет уклонов, высотных отметок и профиля морского дна в ходе прокладки трассы позволяет оптимизировать выбор ее маршрута. Трехмерные координаты точек трассы трубопровода поступают непосредственно из модуля Fledermaus и используются для создания в программе ABAQUS конечноэлементных моделей для подробного расчета участков трубопровода. Данные о координатах также могут использоваться для построения чертежей трассы трубопровода. Типичное изображение профиля



Рис. 6: Детальная геометрическая модель сварного шва с использованием методики микромоделирования
Figure 6: Detailed Weld Geometry using the Sub-Modelling Technique

An Integrated Approach to Pipeline Route Selection

The routing of subsea oil and gas pipelines and flowlines pose particular challenges. Routing is undertaken by integrating third party software with 'Simulator' stress analysis tools, as shown in Figure 7.

The compiled 3-D model is used to plot existing and possible flowline routes. The seabed slope, elevation, and profile can be analyzed while plotting, leading to route optimization. The flowline route XYZ coordinates are directly extracted from Fledermaus and used to create finite element models

ARMAPIPE®

B BETA FENCE



Специальная арматурная сетка, обеспечивающая долговечность защитных железобетонных покрытий трубопроводов

Арматурная сетка ARMAPIPE® обеспечивает надежную защиту морских и наземных трубопроводов, подвергающихся воздействию ударных нагрузок, усадки и сдавливающих нагрузок в суровых условиях эксплуатации. Позволяет создавать защитные покрытия, отличающиеся уникальными показателями по следующим параметрам:

- целостность, однородность и прочность, гарантирующие повышенную устойчивость к ударным нагрузкам;
- высокая эластичность, позволяющая свести к минимуму образование трещин при монтаже трубопроводов;
- выдержанные однородные значения предела прочности на сжатие;
- долговечность защитного покрытия, армированного горячеоцинкованной сеткой.

Возможность поставки изделий серии Armapipe с четырех заводов в разных странах мира позволяет компании Betafence находить гибкие решения для нужд любого проекта.

Betafence NV, Belgium
 Тел. +32 (0)56 73 45 30
 Факс +32 (0)56 73 45 97
 armapipe@betafence.com
 www.betafence.com

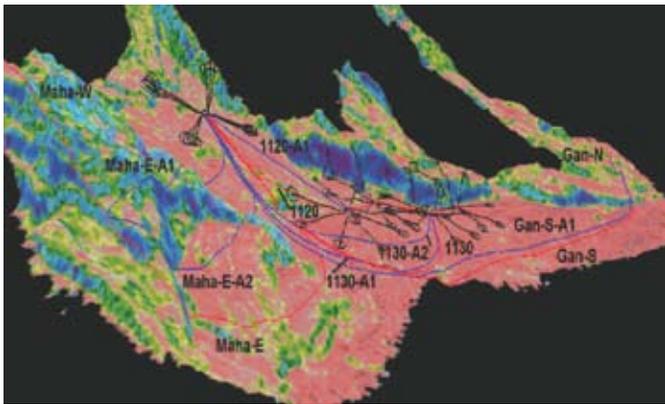


Рис. 7: Выбор трассы трубопровода с помощью программы трехмерного моделирования
Figure 7: Flowline Routing using 3-D Software

по трассе трубопровода показано на рис. 8.

Программный комплекс позволяет перенести с чертежей в трехмерную модель существующие трассы подводных трубопроводов, проанализировать их характеристики, выработать и оценить альтернативные варианты трасс. Модели могут строиться на основе данных двух разномасштабных съемок (например, по сетке 3 и 15 м). При выборе оптимальной трассы предпочтение отдается привязке к точкам наиболее крупномасштабной сетки (с шагом 3 м), но при необходимости предусмотрена возможность использования вариантов, попадающих на участки, не освещенные детальной съемкой. На рис. 9 показан пример трехмерной модели трубопровода с указанием уклонов по первоначальной трассе.

На основе данных съемки формируется трехмерная модель, скомбинированная с цветовой кодированной картой участка, что позволяет представить все данные визуально. Для упрощения анализа в модель включаются карты с обозначением высотных отметок и уклонов цветовой кодировкой. Отображение уклонов на карте цветом облегчает изучение рельефа морского дна, с выделением участков, наименее благоприятных для прокладки трубопровода. Пример модели с графическими обозначениями высотных отметок и уклонов показан на рис. 10. На модели с указанием высотных отметок отображаются сведения о глубине моря, включая участки с наименьшей (выделено розовым цветом) и наибольшей (выделено темно-фиолетовым цветом) глубиной моря. Карты с цветовой кодировкой данных могут использоваться для анализа существующих и прокладки альтернативных трасс. На рис. 10 также приведена расшифровка обозначений уклонов и образец профиля по трассе трубопровода. Уклоны указываются с точностью до десятых долей градуса. При отображении данных моделирования

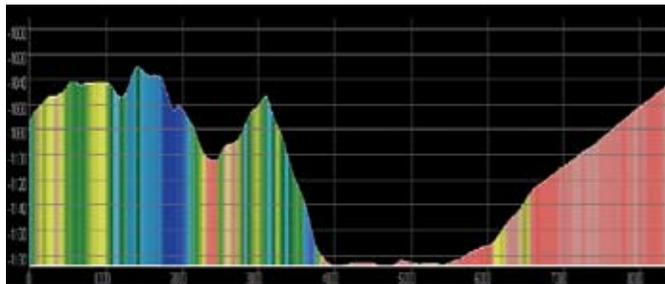


Рис. 8: Профиль по трассе трубопровода
Figure 8: Route Profile

in ABAQUS for detailed span analysis. The coordinates may also be used to create flowline alignment drawings. A typical flowline profile is shown in Figure 8.

Current flowline routes from the Subsea Field Layout Drawing can be plotted in the 3-D model and analyzed, alternate routes can be identified and studied. The model can be compiled from two different sets of survey information if required, for example, data sampled at 3-meter and 15-meter intervals. When selecting optimized paths the routes are preferred to stay in the detailed survey data set (3-meter) but other options which fall outside detailed survey data can be used. Figure 9 shows an example of a 3-D model, and indicating initial route slopes.

The 3-D model is assembled using the survey data and color maps are applied to visually describe the information. The model can be analyzed using color maps describing elevation and slope. The slope color map gives an enhanced perspective of the seabed floor easily highlighting avoidable and problem areas. The model shaded with elevation is shown in Figure 10. The elevation color shades the model based on water depth with the minimum in pink and the maximum in dark purple. This color map can be used to analyze the model and plot the possible alternate routes. The slope legend and example profile are also shown in Figure 10. Slopes are in decimal degrees. The models are viewed with a vertical exaggeration factor of 6 to clearly show avoidable areas, without amplifying the rate of change it would be difficult to pinpoint problem areas. Once the route has been optimized, it is exported

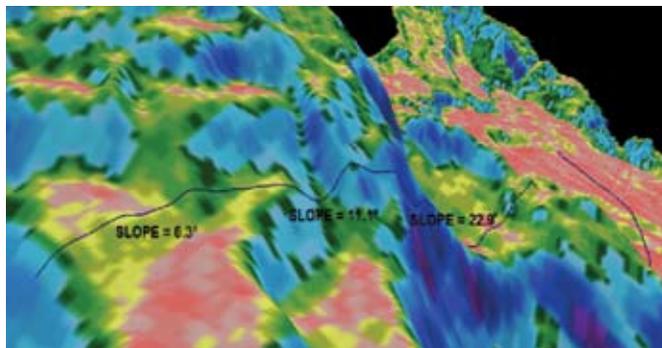


Рис. 9: Уклоны по первоначальной трассе
Figure 9: Initial Route Slopes

вертикальный масштаб увеличивается в шесть раз для облегчения распознавания неблагоприятных для прокладки трассы участков, поскольку без непропорционального масштабирования их гораздо сложнее точно выделить на карте.

После прокладки оптимальной трассы ее координаты переносятся в программу ABAQUS для расчета теплового расширения и бокового выпучивания трубопровода с целью обеспечения надежности выбранных проектных решений.

Оптимизация трассы за счет применения программного обеспечения для трехмерного моделирования в сочетании со средствами расчета напряжений позволяет сэкономить значительные средства. Трехмерная визуализация значительно повышает качество учета и анализа рельефа морского дна и является рекомендуемым методом решения инженерных задач. Описанный метод недавно был использован при проектировании трубопровода на территории Индонезии.

ОТ АВТОРОВ

Компания J P Kenny благодарит всех, кто предоставил сведения, использованные при подготовке настоящей статьи. Особая благодарность выражается проф. Куке Кукатасану (лондонский офис компании J P Kenny).

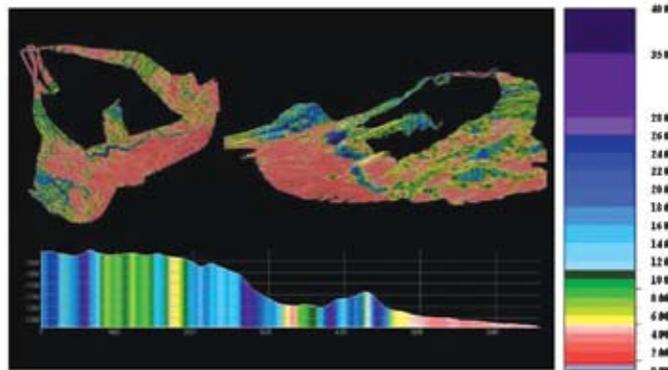


Рис. 10: Модель с цветной картой и указанием уклонов

Figure 10: Slope Color Map Model

into ABAQUS, and pipeline expansion and lateral buckling analysis can be undertaken to ensure a safe and robust design. An optimized route using 3-D software, integrated with stress analysis, will allow significant financial savings. 3-D visualization provides significant benefits in understanding the seabed morphology and is the preferred choice for engineering applications. This methodology has been recently adopted on a project in Indonesia.

ACKNOWLEDGEMENTS

J P Kenny would like to thank all who participated in providing information for this paper. A special thank you is given to Dr. Kuka Kukathasan, J P Kenny Ltd (London Office).



Системы гигиенической очистки труб - Решения по извлечению продукции -



- Долговечная конструкция СОД
- Надежная работа
- Растворы, изготовленные по условиям заказчика
- Эффективное удаление продукта
- Бесконтактное обнаружение СОД
- Системы распределения продукта, приспособленные для очистки СОД



Эффективность
Экологичность

Тел.: +44 (0) 115 925 4700
Факс: +44 (0) 115 925 4645
Эл. почта: info@hps-pigging.com
Веб-сайт: www.hps-pigging.com

Надежность
Долговечность